

# EPS(Expanded Polystyrene) 블록의 충격특성에 관한 연구

## Study on Crush Characteristics of EPS(Expanded Polystyrene) Block

고만기\* · 김기동\*\* · 성정곤\*\*\* · 김진만\*\*\*\*

Ko, Man Gi · Kim, Kee Dong · Sung, Jung Gon · Kim, Jin Man

### 1. 서론

충격흡수 시설은 교량의 교각 등의 노변 구조물 중 충돌 시 탑승자의 안전을 위협할 수 있는 강성의 노변구조물을 감싸서 충돌차량의 충격을 최소화하기 위한 시설이다. 아직까지 우리나라에 충격흡수시설이 설치된 곳은 중앙분리대의 시 종점부와 Gore Area에 집중되어 있으나 충돌 시 피해가 우려되는 잠재적 위험구조물은 도심의 고가차도 기둥, 방음벽 용벽의 시종점, 전신주, 교명주, 터널의 전면부 등 종류와 형태가 매우 다양하다. 따라서, 각 위험 구조물 별로 그 형태와 장소에 꼭 맞는 충격흡수 장치를 개발한다는 것은 실용적이지 못하다. 현실적으로 이러한 다양한 형태의 구조물을 감싸서 충돌차량의 에너지를 적절히 흡수할 수 있는 방법 중의 하나가 Module화 된 Element를 공간이 허용하는 한도 내에 적층 시켜서 다양한 형태를 만드는 방법이다. 국내의 충격흡수시설 관련 규정(건설교통부, 1998)에조차 정형화된 베리어 단부용 충격흡수시설 외에는 이러한 형태가 자유로운 Module화된 Element를 적층하는 방식의 충격흡수 시설에 대한 언급이 없는 새로운 개념이나 비정형구조물이 불규칙하게 산재된 우리나라의 도로 특성 상 개발이 시급한 형식이다.

모듈 재료의 기본 조건은 내후성과 경제성이 있고 가공이 쉬워야 하며, 소성영역에서 많은 에너지를 소산시킬 수 있어야 한다.(김경주, 2004) 이러한 특징을 갖는 재료 중 하나가 토목섬유의 일종인 EPS(Expanded Polystyrene)이다.(한국건설기술연구원, 2004) EPS 블록은 1972년 노르웨이 국립도로연구소(NRRL)에서 연약지반 대책공법의 하나로 성토재로 사용된 이래(Roald Aaboe, 1987) 용벽, 하천 및 항만 제방분야의 토체 구성 및 지반보강에 사용되어 유효성을 인정 받은 재료이고 하중-변위관계가 충격흡수 장치가 일반적으로 요구하는 적은 탄성구간과 긴 소성영역을 갖는 특징이 있어서 충격흡수 시설의 모듈 재료로 적절한 성능을 갖고 있다고 볼 수 있다. 본 연구에서는 이러한 모듈 적층 식 충격흡수시설 재료후보 중의 하나인 EPS블록에 대하여 Drop Test를 통한 충격실험을 실시하여 기본적인 하중-변위 특성, 모듈 당 에너지 흡수능력, Bottoming Distance등, 적층형 충격흡수시설 설계에 필요한 기본 데이터를 구하는 과정을 보이고 실험 결과를 요약한 것이다.

### 2. 충격흡수시설 동적실험

충격흡수시설과 같은 동적 하중을 받는 부재의 거동을 정확하게 파악하기 위해서 Impact Hammer(W.J. Storge, 1987)를 사용한 실험이나, Pendulum 실험(L.C. Bank, 2001) 혹은 Drop Test를 실시하는데, 본 연구에서는 EPS블록의 충격하중에 대한 거동을 살펴보기 위하여 Drop Test를 실시하였다. Drop Test는 도로안전 시설의 빔, 지주와 같은 주요 부재뿐만 아니라 Guardrail의 Blockout과 같은 소규모 부재의 동적 거동을 살펴보는 데 적합한 방법으로 정확한 타격이 장점이다.

\* 정회원. 공주대학교 건설환경공학부 부교수. 공학박사. 041-855-7972 (E-mail : mgko@kongju.ac.kr)

\*\* 정회원. 공주대학교 건설환경공학부 부교수. 공학박사. 041-855-7972 (E-mail : kkkim@kongju.ac.kr)

\*\*\* 정회원. 한국건설기술연구원 도로연구부 수석연구원. 공학박사. 031-9100-179 (E-mail : jgsung@kict.re.kr)

\*\*\*\* 정회원. 한국건설기술연구원 지반연구부 선임연구원. 공학박사. 031-9100-221 (E-mail : jmkim@kict.re.kr)

## 2.1 Drop Test

본 연구에서 사용한 Drop Test는 가속도계가 상부에 부착된 310kg의 Mass를 일정 높이에서 자유낙하 시켜 EPS 블록을 횡방향으로 타격하여 Crush동안 가속도를 측정하는 방법이다. 충돌속도는 식,  $v = \sqrt{2gh}$ (h는 낙하높이)를 이용하였으며 고속사진촬영결과로 이를 확인하였다. Drop Test의 Layout은 <그림 2>와 같고, Mass의 직경은 정적 실험 시 재하 판의 폭과 같은 300mm이다. EPS블록의 제원은 정적실험과 같이 가로450mm, 세로450mm, 높이300mm이다.

Drop Mass의 상부에  $\pm 100g$ 와  $\pm 500g$ 용량의 가속도계 2개를 설치하였으며, 가속도계는 Piezo Type인 PIEZOTRONICS사의 353B32 모델(100g)과 353B15 모델(500g)을 사용하였다. 가속도 데이터는 IOtech Data Acquisition System을 사용하여 획득하였다. 분석에 사용될 데이터는 가속도계(100g, 500g)로부터 Sampling Rate 5,000Hz로 계측하였고, 노이즈 제거를 위해 180Hz Filtering을 실시하였다. 이렇게 얻은 가속도-시간 데이터를 사용하여 충돌 하중, 속도, 변형의 시간 이력 및 하중-변형, 에너지-변형 관계를 구하여 비교하였다. 충돌 하중 산정방법은 Newton의 제2법칙을 사용하여 획득한 가속도에 충돌체의 Mass를 곱함으로써 구할 수 있으며, 속도는 가속도를 시간에 따라 적분하여 얻을 수 있고, 변형은 속도를 시간에 따라 적분하여 구할 수 있다. 이상의 데이터로부터 하중-변형관계 및 에너지-변형관계를 얻을 수 있다.

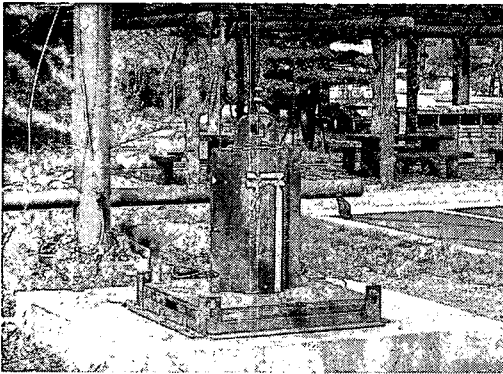


그림 1 Drop Hammer

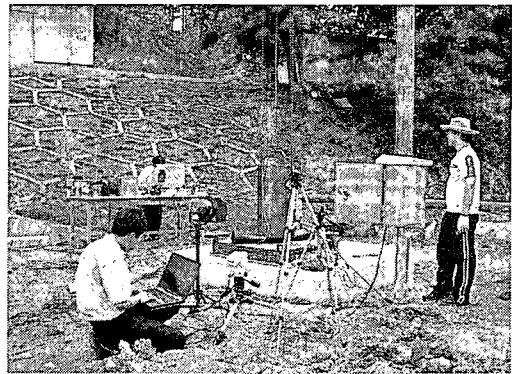


그림 2 Drop Test Layout

충돌실험의 낙하 높이는 최대 5m로 이는  $35.6\text{km/h} (= \sqrt{2 \times 5 \times 9.8} \text{m/sec})$ 의 충돌속도에 해당한다. 한편, 충돌실험은 MotionXtra HG-LE 고속카메라를 이용하여 1000frame/sec의 속도로 촬영하였으며, 촬영된 사진 자료를 SAI(SENSORS APPLICATIONS INC)사의 Image Express MotionPlus를 이용하여 분석한 후 계측 Data와 비교 검토하였다. 또 충돌은, 최대낙하높이 5m를 이용하되, 충돌속도별 EPS블록의 특성을 살펴보기 위하여 낙하높이를 1m에서부터 5m까지 1m씩 증가시키면서 실시하였다. 실험은 EPS Block의 밀도를  $20\text{kg/m}^3$  및  $30\text{kg/m}^3$ 로 달리하여 실시하였다.

실험결과는 충돌전후 상태를 보여주는 Still사진, 계측된 가속도-시간 이력과 가속도를 적분하여 구한 속도-시간 이력, 속도를 적분하여 구한 변위-시간 이력, 가속도-시간 이력과 변위-시간 이력으로부터 구한 힘-변형관계, 힘-변형 관계로부터 구한 에너지-변형 관계 순으로 정리하였다. 한편, 고속 촬영한 결과로부터 도출한 위치-시간(=변형-시간 이력) 관계를 시간에 대하여 미분하여 구한 속도-시간 이력, 속도-시간 이력을 미분하여 구한 가속도-시간 이력 순으로 정리하였으며, 이를 가속도계를 이용한 계측 결과와 비교하였다. 또한 계측된 하중 변형 관계는 정적 실험결과와 비교하였다.



2.2 실험내용 요약

실험은 D20 및 D30 시리즈로 구성되는데 D20은 밀도 20kg/m<sup>3</sup>의 EPS를 D30은 밀도 30kg/m<sup>3</sup>의 EPS 블록을 의미하며 Mass의 낙하높이를 H다음에 m로 표시하여 실험의 명칭을 구분하였다. 즉, D20H2는 밀도 20kg/m<sup>3</sup>의 블록에 대해 2m 높이에서 Mass를 낙하시켜 타격한 것을 의미한다. D20 및 D30 시리즈 중 D20H5 및 D30H5는 각기 A, B 기호가 첨가되었는데 이는 같은 실험을 2차례 반복하였음을 의미한다.

2.2.1 D20H5A, D20H5B, D20H1, D20H2, D20H3, D20H4

밀도 20kg/m<sup>3</sup>, 가로×세로×높이 450×450×300mm인 EPS 블록에 무게 310kg (지름300mm)의 Mass를 5 m 높에서 낙하시켜 가속도를 측정하고 이를 이용하여 속도와 변형의 시간이력, 하중-변형관계를 구한 것이다. 이는 충돌속도 35.5km/h에 상당하는 충격으로 설계속도에는 미치지 못하나, 정적실험에 비하여 속도의 영향을 가늠할 수 있는 것이다. 속도별 영향을 구체적으로 살펴보기 위하여 낙하높이를 1m로부터 5m까지 1m씩 증가시켜가며 충돌실험을 진행하여 결과를 중첩시켰다.

사진<그림4>에서 볼 수 있듯이 H=5m 충돌 시, Drop Mass의 단면을 벗어나는 부위는 탈락되어 충격흡수에 큰 기여를 하지 못하고 있다. 가속도는 최대 71 g로 높은 치수를 보이고 있는데<그림 5> 이로부터 15.4 KJ의 충격으로 시편이 Bottoming에 이르렀음을 알 수 있다. <그림 6>은 가속도-시간이력을 적분하여 계산된 속도-시간이력으로 35.5km/h의 충돌속도에서도 충돌속도의 50%에 상당하는 반발속도가 있음을 알 수 있다. 또한 <그림 7> 및 <그림 8>의 변위-시간 곡선에서도 H=1m 와 H=2m의 충돌에서는 큰 반발 없이 에너지를 흡수하고 있으나 H=3m, 4m, 5m의 충돌에는 상당한 반발변위를 관찰 할 수 있다. 마지막으로, <그림 8>의 힘-변위곡선을 보면 H=3m, 4m, 5m에서 Bottoming 현상을 극적으로 관찰 할 수 있다. Bottoming이 생기는 정확한 변위 및 충돌에너지를 알기 위해서는 낙하높이를 서서히 증가시켜가면서 <그림 8> 및 <그림 9>와 같은 힘-변위곡선과 에너지-변위곡선을 그려보는 것이다. <그림 8> 곡선으로부터 하중-변위 Envelope는 충돌 높이별 큰 차이를 보이지 않고 정적실험 결과와 유사하며(한국건설기술연구원, 2004) Bottoming은 20 정도에서 시작됨을 알 수 있다. <그림 9>의 에너지-변위 관계로부터 D20 (가로×세로×높이; 450×450×300 mm)인 EPS 블록이 Bottoming 이전에 흡수할 수 있는 에너지는 6.07 KJ 로 볼 수 있다. <그림 10>은 고속촬영 사진을 분석하여 변형, 속도 및 가속도의 시간이력을 구한 것인데 중간에 파편이 Drop Mass의 Marker를 가려서 그래프가 중단된 것으로 보인다. 그러나 이 부분을 연속시켜서 계측데이터와 비교 분석한 결과(그림 11, 그림 12) 잘 일치하고 있으므로 가속도계를 이용한 계측치의 정확도를 간접적으로 확인할 수 있다.



그림 3 D20H5A의 실험 전



그림 4 D20H5A의 실험 후

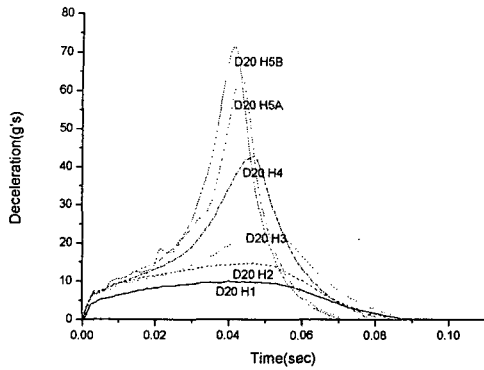


그림 5 D20 H=1~5m. 가속도-시간

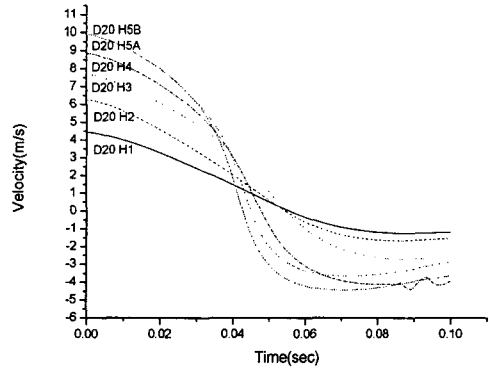


그림 6 D20 H=1~5m. 속도-시간

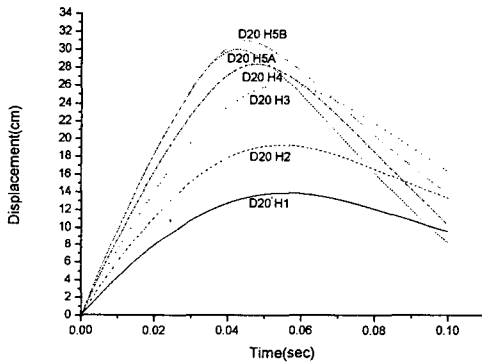


그림 7 D20 H=1~5m 변위-시간

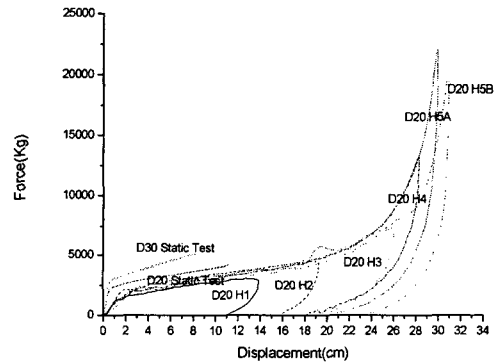


그림 8 D20 H=1~5m, 힘-변위

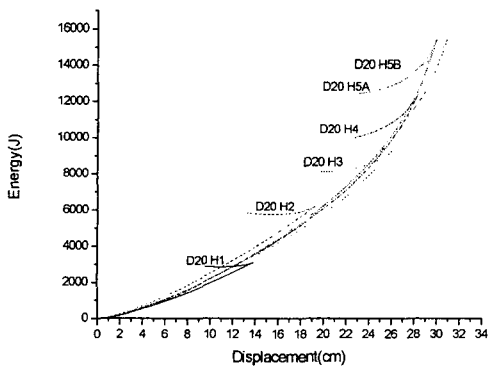


그림 9 D20 H=1~5m, 에너지-변위

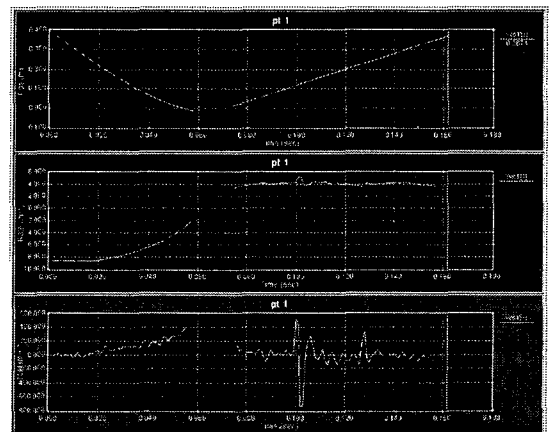


그림 10 D20 H5A 고속사진 분석

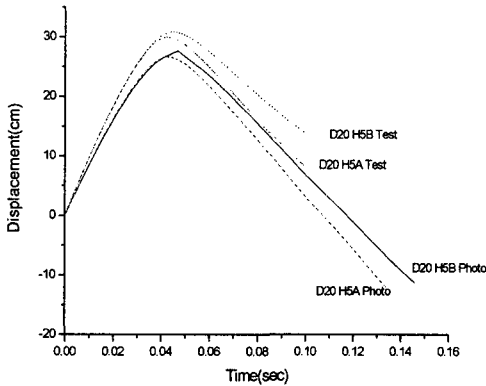


그림 11 D20 H=5m, 변위-시간

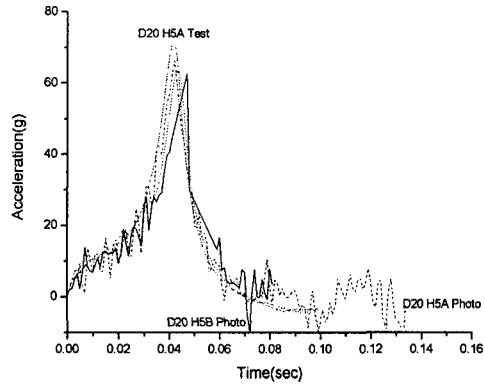


그림 12 D20 H=5m, 가속도-시간

2.2.2 D30H5A, D30H5B, D30H1, D30H2, D30H3, D30H4

밀도 30kg/m<sup>3</sup>, 가로×세로×높이 450×450×300mm인 EPS 블록에 무게 310kg (지름300mm)의 Mass를 5m 높이에서 낙하시켜 가속도를 측정하고 이를 이용하여 속도와 변형의 시간이력, 하중-변형관계를 구한 것이다. 이는 충돌속도 35.5km/h에 상당한다. 속도별 영향을 구체적으로 살펴 보기위하여 낙하높이를 1m로부터 5m까지 1m씩 증가시켜가며 충돌실험을 진행하여 결과를 중첩시켰다.

사진(그림 14)에서 볼 수 있듯이 H=5m 충돌 시, D20의 경우와 마찬가지로 Drop Mass의 단면을 벗어나는 일부부위는 탈락되어 충격흡수에 큰 기여를 하지 못하고 있는 것으로 보인다. 그러나 탈락부위가 밀도 20kg/m<sup>3</sup>인 시료에 비하여 국부적이다. 가속도는 최대 33.7g를 보이고 있는데(그림 15) 밀도 20kg/m<sup>3</sup>의 시편에 똑같은 충격량을 가한 것보다 훨씬 적은 수치이다. 이로부터 15.4KJ의 충격에도 시편이 D20 실험체처럼 완전한 Bottoming에 이르지 않고 있음을 알 수 있다. <그림 16>의 속도-시간이력으로부터 35.5km/h의 충돌속도에서도 충돌속도의 32.5%에 상당하는 반발속도가 있음을 알 수 있다. <그림 17>의 변위-시간 곡선에서도 H=1m 와 H=2m의 충돌에서는 큰 반발 없이 에너지를 흡수하고 있으나, H= 4m, 5m의 충돌에는 상당한 반발변위를 관찰 할 수 있다. 그러나, D20H5에 비해서는 안정적이다. 마지막으로, <그림 18>의 하중-변위곡선을 보면 H= 4m, 5m에서 Bottoming 현상이 시작되고 있는 점을 관찰 할 수 있다. Bottoming이 생기는 정확한 변위 및 충돌에너지를 알기 위해서는 낙하높이를 서서히 증가시켜가면서 <그림 18> 및 <그림 19>와 같은 힘-변위곡선 과 에너지 변위곡선을 그려보는 것이다. <그림 18>곡선으로부터 충돌 높이별 하중-변위 Envelope는 큰 차이를 보이지 않고 정적실험 결과와 일치하며(한국건설기술연구원, 2004), D20의 경우처럼 확실한 구간을 보기 힘들지만 Bottoming은 20cm 정도에서 시작된다고 볼 수 있다. <그림 19>의 에너지-변위 관계로부터 D30 (가로×세로×높이 450×450×300mm)인 EPS 블록이 Bottoming 이전에 흡수할 수 있는 에너지는 10KJ 로 볼 수 있다.

<그림 20>은 고속촬영사진을 분석하여 변형, 속도 및 가속도의 시간이력을 구한 것이다. 이 데이터를 계측데이터와 비교 분석한 결과<그림 21, 그림 22> 잘 일치하고 있으므로 가속도계를 이용한 계측치의 정확도를 간접적으로 확인할 수 있다.

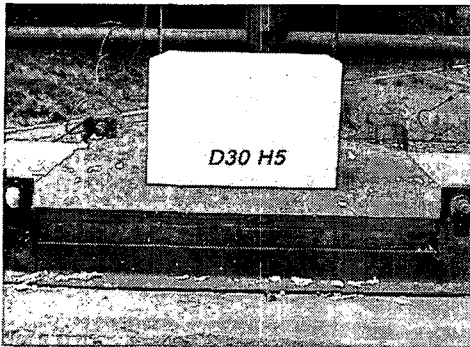


그림 13 D30 H5A의 실험 전

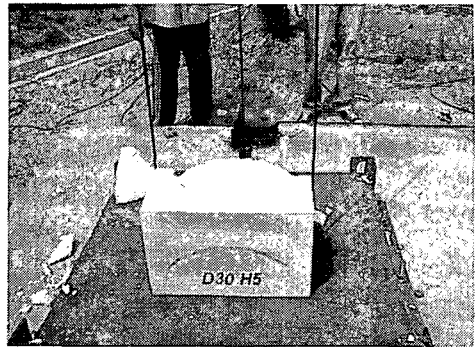


그림 14 D30 H5A의 실험 후

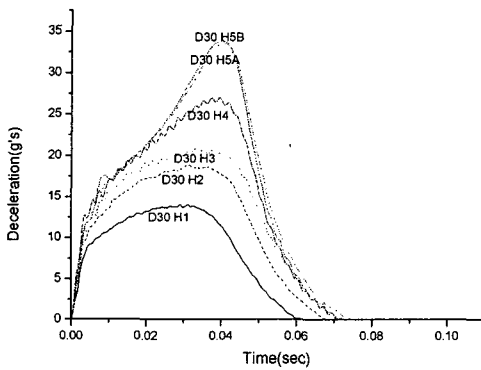


그림 15 D30 H=1~5m, 가속도-시간

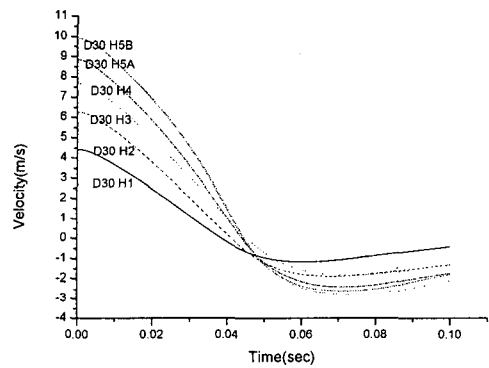


그림 16 D30 H=1~5m, 속도-시간

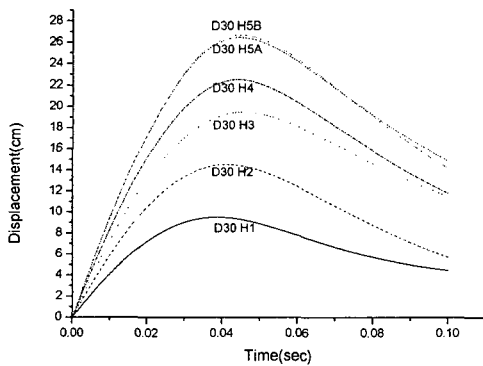


그림 17 D30 H=1~5m, 변위-시간

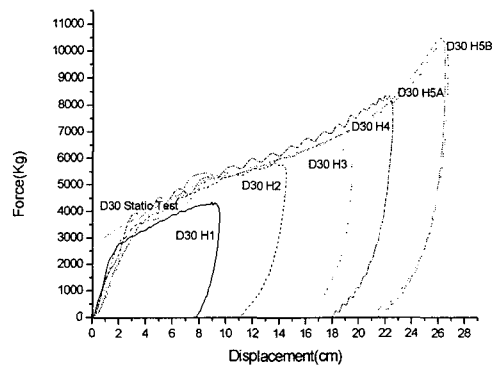


그림 18 D30 H=1~5m, 힘-변위

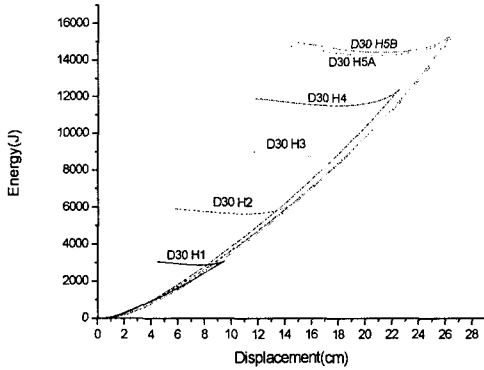


그림 19 D30 H=1~5m, 에너지-변위

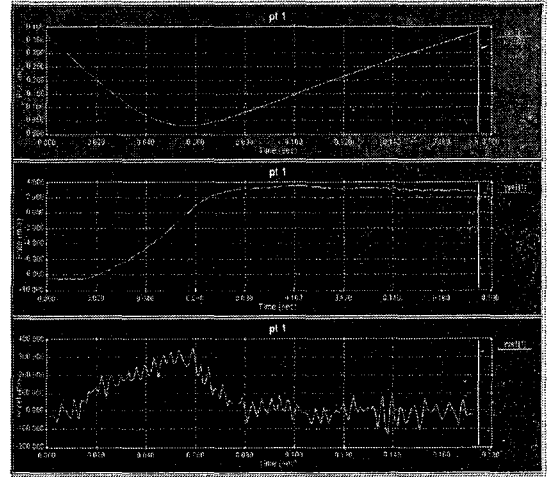


그림 20 D30H5A 고속사진 분석

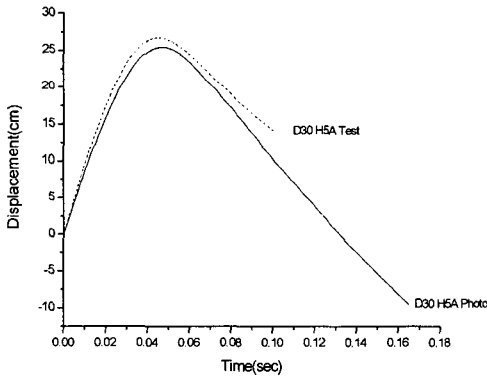


그림 21 D30 H=5m, 변위-시간

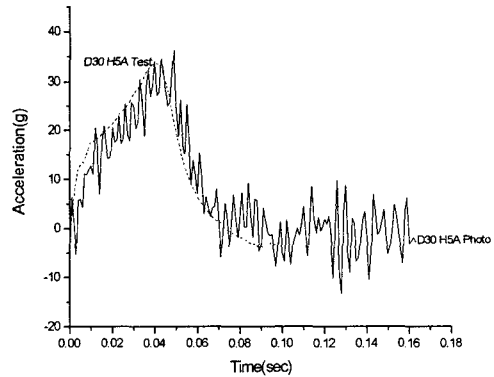


그림 22 D30 H=5m, 가속도-시간

### 3. 실험결과 요약

충돌속도가 35.5km/h로 제한적이기는 하나 실험 결과를 정리하면 EPS 블록 및 실험 방법과 관련하여 다음과 같은 일반적인 경향을 알 수 있다.

1. 저속 충돌에서 충돌속도 별 EPS 재료의 하중-변형 특성은 다르지 않다.
2. 저속 충돌에서 하중-변형 특성은 정적실험 결과와 거의 일치하므로 충격흡수 시설 설계를 목적으로 한 EPS 재료의 하중-변형 특성은 정적 실험 결과를 이용할 수 있다.
3. 밀도 20kg/m<sup>3</sup> 크기 450×450×300mm인 EPS 블록의 Bottoming 변위는 20cm이고 Bottoming 이전에 흡수할 수 있는 에너지는 6 KJ 정도 이다.
4. 밀도 30kg/m<sup>3</sup> 크기 450×450×300mm인 EPS 블록의 Bottoming 변위는 20cm이고 Bottoming 이전에 흡수할 수 있는 에너지는 10 KJ 정도 이다.
5. 충격흡수시설의 설계에 필요한 변형 거리는 대략 부재 길이의 70% (≒20/30)로 보면 된다.



6. 재료의 적층시 정확한 Bottoming 변위 와 최대 에너지흡수 용량을 알기 위해서는 충격력을 증대시키기 위한 실험설비의 용량 증대가 필요하다.
7. 1000 frame/sec 이상의 고속촬영 결과는 가속도계로부터 구한 데이터의 보조 자료로 활용될 수 있다.
8. Drop Test는 정적 실험에서 발생하는 제한된 Stroke로 인한 실험 한계와 같은 변위의 제한을 받지 않는다.

#### 감사의 글

본 연구는 건설교통부에서 지원하는 건설기반기술 혁신사업의 일부로, 지원에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. 건설교통부, 도로안전시설 설치 및 관리지침, 중앙분리대 및 충격흡수시설 편, 1998
2. 김경주, 승용차의 충돌거동 및 충격완화장치 설계에 관한 연구, 공주대학교 석사학위 논문, 2004. 02
3. 한국건설기술연구원, 토목섬유를 이용한 저비용 충격흡수시설 개발연구 연차실적 보고서, 2004
4. Roald Aaboe, *13 years of experience with polystyrene as a lightfill material in road embankments, Plastic Form in Road Embankments, Moddelelse nr 61, NRRL, 1987*
5. W.J. Stornge and V.P.W. Shim, *DYNAMIC CRUSHING OF A DUCTILE CELLULAR ARRAY, International Journal of Mechanics Science, 1987*
6. L.C. Bank, T.R. Gentry, *Development of a Pultruded Composite Material Highway Guardrail, Applied Science and Manufacturing, Composite Part A, 2001*