

MADYMO를 이용한 폭발 하중에 따른 인체 상해평가 및 분석

최호민*, 김재기*, 백인석*, 이인영*, 권대령*, 이석순*,#

*경상대학교 대학원 기계항공공학부

Injury Assessment and Analysis under Blast Load Using MADYMO

Ho-Min Choi*, Jae-Ki Kim*, In-Seok Pack*, In-Young Lee*, Dae-Ryeong Kwon*, Seok-Soon Lee*#

* School of Mechanical and Aerospace Engineering, ERI, Gyeongsang National University.

(Received 27 July 2016; received in revised form 20 August 2016; accepted 25 September 2016)

ABSTRACT

There is a need for explosion experiments for explosion-related research. However, there are many restrictions in performing an actual experiment. Therefore, in this paper, an alternative method of overcoming the constraints of an explosion experiment has been conducted using a passenger behavior analysis program called MADYMO to assess and analyze the human body injury due to explosion load. To increase the reliability of the analysis, a drop test has been conducted with the analysis. We provide a new framework for performing the analysis. In future, we will further develop our research with the goal of reducing the opportunity cost for the study of the human body injury.

Key Words : MADYMO(마디모), Drop Test(낙하 시험), Dummy Model(더미 모델), Shock Absorber(쇼크 업소버), Blast Analysis(폭발해석)

1. 서 론

현재 세계는 종교 및 영토, 정치적 문제 등 서로의 이해관계에 얽혀 테러와의 전쟁으로 몸살을 앓고 있다. 테러로 인한 폭발은 많은 사람에게 고통을 주고 심하게는 죽음에 이르게 하고 있다. 이러한 상황에 비추어 폭발물과 테러에 대한 연구가 절실한 상황이라 할 수 있다. 폭발 관련 연구를 위해서는 폭발 실험이 필요하다. 하지만 국내에서는 충분한 실험을 위한 장소 구비에 제한이 있으며 폭약 사용을 위한 관계 기관 협조, 폭발물 구입 및 실험 시행에 따른 민원 발생, 막대한 실험

비용 등의 많은 애로 사항이 있다.^[1] 따라서 현재 실제 실험의 제약 사항을 극복하기 위해 컴퓨터 프로그램을 이용한 해석이 많이 연구되고 있다.^[2-5] 본 연구에서는 네덜란드의 TNO (The Netherlands Organization for Applied Scientific Research)에서 개발한 승객거동해석 프로그램인 MADYMO (MAtheMatical DYnamical MOdel)를 이용하였다. 컴퓨터 프로그램을 이용한 해석은 현실 세계의 다양한 변수가 충분히 고려되지 않을 수 있고 이는 결과의 신뢰성에 영향을 끼칠 수 있지만, 뛰어난 반복성과 적은 비용, 실험을 통해 알기 힘든 복잡한 관계를 통찰할 수 있다는 큰 장점이 있기에, 본 연구에서는 신뢰성 높은 컴퓨터 프로그램 해석법 구축에 목표를 두었다. MADYMO에서는 다양한 Dummy와 인체 해석 모델을 제공하고 있으며,

Corresponding Author : leess@gsnu.ac.kr

Tel: +82-55-772-1622, Fax: +82-55-772-1577

이러한 해석 모델을 이용하여 폭발 하중에 대한 탑승자의 인체상해를 평가 및 분석하였다.

2. Damper 설계 및 Drop test

폭발에 따른 하중은 큰 충격이 가해지므로 인체의 상해를 줄이기 위해서는 일반적으로 시중에 판매되는 Damper를 사용하기는 힘들다. 따라서 용도에 알맞은 Damper를 설계 및 제작하였다. 보통 Accumulator의 위치는 대개 Shock Absorber의 Body 내 위쪽 부분에 위치하는데 피스톤 로드를 중공축으로 설계하고 이 공간을 Accumulator로 활용하였다. 이로 인해 오일을 수용할 수 있는 용량이 더 확장되고, 이는 곧 Shock Absorber의 충격 감쇠 성능과 직결된다. 또한, 오리피스를 위, 아래, 양옆 4방향 7층으로 설계하여 피스톤 로드가 후진하여 단일압축이 일어날수록 반발력이 커지도록 설계하였다. 이러한 장치들로 인해 충격 감쇠를 극대화할 수 있으므로 순간적인 충격이 아주 클 것으로 예상되는 폭발사고에 적합한 Damper를 설계 및 제작하였다.

Drop Test란 구조물의 자유 낙하 시 제품 Frame에 작용하는 충격가속도와 완충장치를 통해 제품에 전달되는 가속도 값을 측정함으로써 그 감쇠 효과를 확인하는 실험이다. 따라서 제작한 Damper가 장착된 의자를 만들고 그 위에 마네킹을 착좌시켜 폭발 충격과 비슷한 환경의 Drop test를 수행하였다.

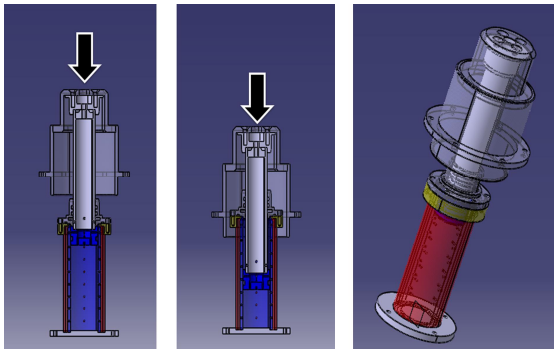


Fig. 1 Shock absorber damper



Fig. 2 Drop test

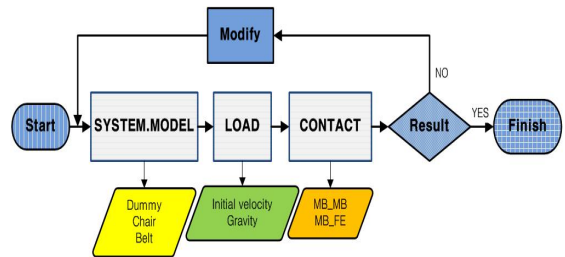


Fig. 3 Analysis process in FEM

3. 모델링 및 해석조건

MADYMO 프로그램 해석 순서는 Fig. 3과 같이 크게 해석 모델생성, 경계조건 설정, 접촉조건 부여 순으로 진행된다. 가장 먼저 모델을 생성하는데 MADYMO 프로그램 내에서 Multi-Body와 Finite Element를 이용하여 모델링 하였다. 의자와 Damper system은 SURFACE.ELLIPSOID을 이용하여 Multi-Body로 생성하였고, Dummy model은 MADYMO 프로그램에 내장되어 있는 Hybrid III 50th를 선정하고 이를 불러와 의자에 착좌시켰다. Dummy model을 착좌시킨 후 안전벨트를 생성하는데 이때, 폭발 사고의 특성상 비교적 큰 충격이 가해질 것이므로 일반적인 3점식 안전벨트가 아닌 어깨와 허리, 양쪽 가랑이를 5방향으로 감싸주는 5점식 안전벨트를 생성하였다. 이는 상체를 모두 감싸 주어 3점식에 비해 안전하고, 큰 충격이 가

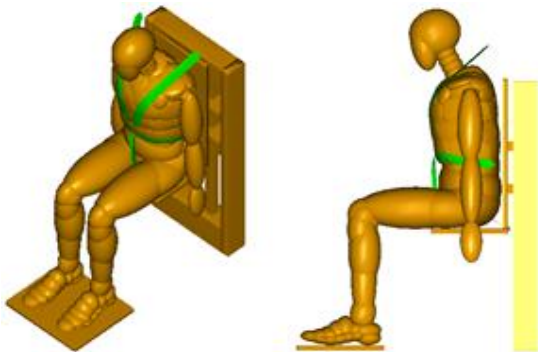
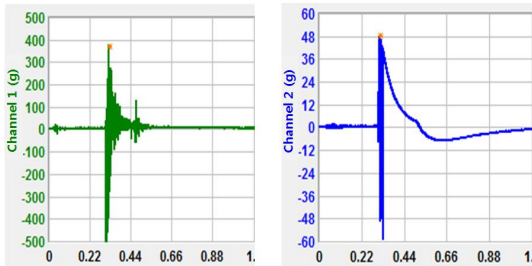


Fig. 4 Seating posture modeling in MADYMO

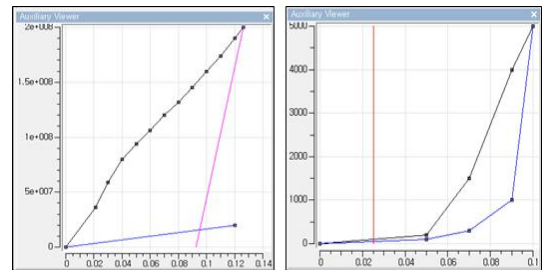


(a) Floor acceleration (b) Seat acceleration

Fig. 5 Drop test results

해질 때 인체를 꼭 잡아주므로 폭발 충격으로 인해 승객이 튕겨 나가는 것을 예방해 줄 것이다. 5점식 안전벨트 모델링은 Belt Fitting 기능을 이용하여 넓이 40mm로 설정하여 Dummy model에 접촉시키고 Finite Element로 구성하였다. 이러한 과정을 거쳐 모델을 완성하였고 그 결과가 Fig. 4이다. 모델링을 완성한 후에는 각각의 파트에 물성치를 적용시켜야 한다. Damper의 물성치를 입력하기 위해 Drop test 결과를 분석한 결과 Fig. 5와 같이 바닥부 가속도가 400g로 지뢰폭발과 비슷한 충격을 받았고 의자 Seat부의 가속도는 Damper의 충격완화로 인하여 50g를 기록하였다. 이에 따라 MADYMO 프로그램에 Seat부의 가속도가 50g가 나오도록 Damper의 물성치를 입력하였다.

그 후 Fig. 6과 같이 의자 Seat 및 Belt 물성치를 적용하였다. 마지막으로 접촉조건은 Damper system, Dummy, 의자는 Multi-Body로써 서로 간에



(a) Belt (b) Seat

Fig. 6 Material property and Load

CONTACT.MB_MB를 주었고 벨트는 Finite Element로써 Dummy와의 접촉 부분에 CONTACT.MB_FE를 적용하였다.

4. 해석 결과

모델링 결과를 토대로 승객거동해석 프로그램인 MADYMO를 이용하여 해석을 수행하였다. 해석결과 폭발 하중에 의한 Simulation과 인체 여러 부위의 상해 정도를 도출할 수 있었다. 앞서 실행한 Drop test의 실험을 지뢰 폭발 실험과 유사한 환경에서 실행하였기에, 해석결과를 평가·분석할 기준으로 지뢰폭발에 대한 인체상해 평가기준지표인 AEP-55를 참고하였으며 이를 Fig. 7에 나타내었다.

폭발 하중에 대한 탑승 인원의 Simulation은 Fig. 8과 같이 나타났다. Simulation 결과를 육안으로 분석하였을 때 목과 허리를 제외하고는 특별히 큰 상해를 입을 만한 거동은 보이지 않았으나, 눈에 보이지 않는 상해를 알아보고 좀 더 신뢰성 있고 정량적인 인체상해 평가를 위하여 Head, Neck, Thorax, Spine, Femur, Tibia, Non auditory pressure induced injuries 등으로 인체부위를 나누어 살펴보았다. 그 결과를 Fig. 9과 같이 그래프로 나타내었고 인체상해 평가 지표인 AEP-55와 비교하였을 때 모든 항목에 있어 만족함을 확인할 수 있었다.

Body region	Criterion	IARV	Pass level
Head	Head Injury Criterion	HIC ₁₅	250
Neck	Axial compression force	Fz-	4.0 kN - 0 ms / 1.1 kN > 30 ms (Figure in appendix E.6.3)
	Axial tension force	Fz+	3.3 kN @ 0 ms / 2.8 kN @ 35 ms / 1.1 kN > 45 ms (Figure in appendix E.6.3)
	Shear force	Fx+- / Fy+-	3.1 kN @ 0 ms / 1.5kN @ 25-35 ms / 1.1 kN > 45 ms (Figure in appendix E.6.3)
	Bending moment (flexion) Bending moment (extension)	Moc _y + Moc _y -	190 Nm 77 Nm
Thorax	Thoracic Compression Criterion	TCC _{frontal}	30 mm
	Viscous Criterion	VC _{frontal}	0.70 m/s
Spine	Dynamic Response Index	DRI _z	17.7
Femur	Axial compression force	Fz-	6.9 kN
Tibia*	Axial compression force	Fz-	2.6 kN (Mil-LX, upper load cell) 5.4 kN (HIII, lower load cell)
Non auditory pressure induced injuries	Chest wall velocity predictor	CWVP	3.6 m/s

Fig. 7 AEP-55 Human injury standard

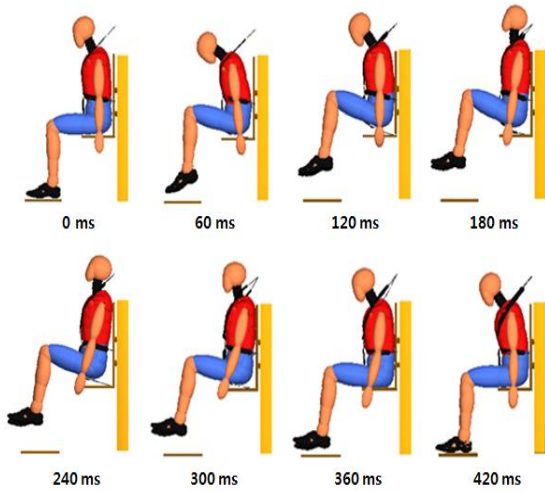
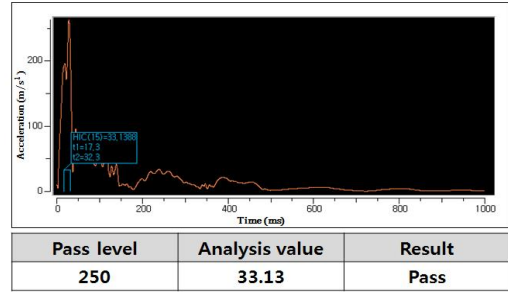
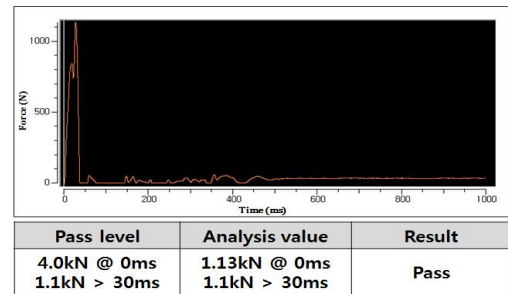


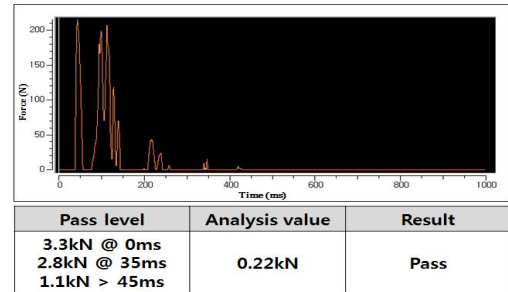
Fig. 8 Analysis simulation in MADYMO



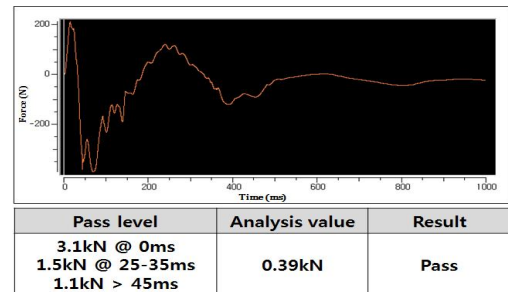
(a) Head - HIC



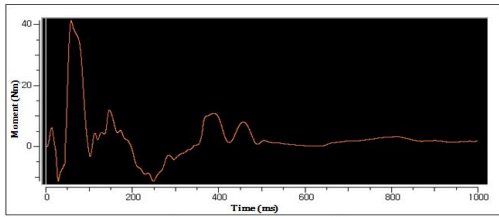
(b) Neck - compression force



(c) Neck - tension force

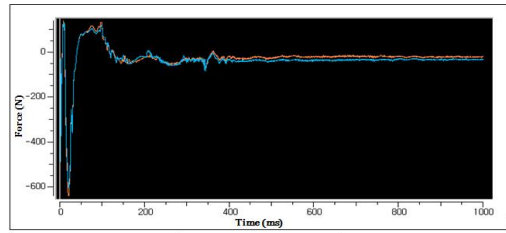


(d) Neck - Shear force



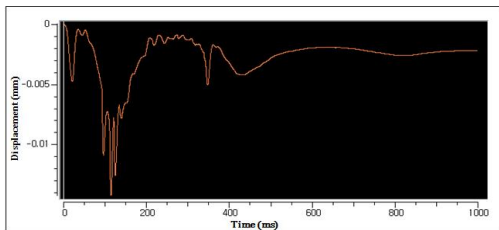
Pass level	Analysis value	Result
+190Nm / -77Nm	+41.33Nm / -11.33Nm	Pass

(e) Neck - Bending moment



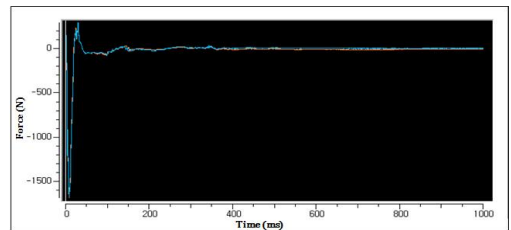
Pass level	Analysis value	Result
6.9kN	0.64kN	Pass

(i) Femur



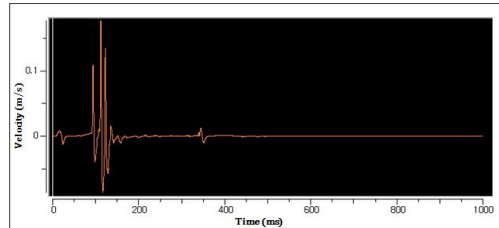
Pass level	Analysis value	Result
30mm	14.21mm	Pass

(f) Thorax - TCC



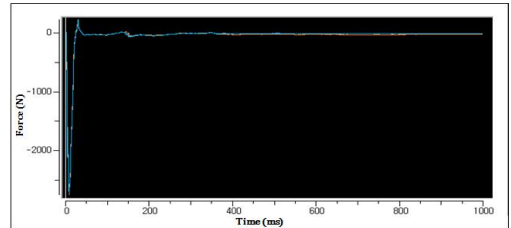
Pass level	Analysis value	Result
2.6kN	1.682kN	Pass

(j) Tibia - upper



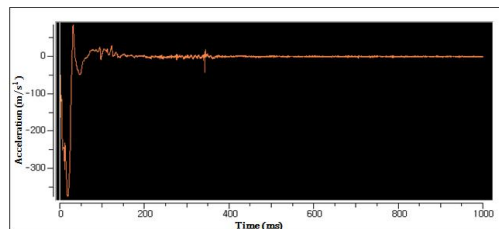
Pass level	Analysis value	Result
0.70m/s	0.18m/s	Pass

(g) Thorax - VC



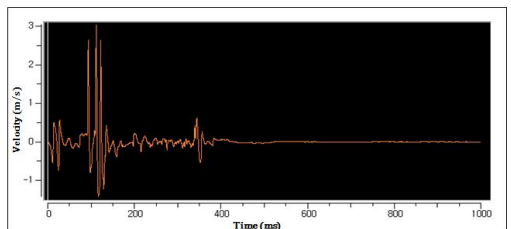
Pass level	Analysis value	Result
5.4kN	2.742kN	Pass

(k) Tibia - lower



Pass level	Analysis value	Result
17.7	15.3	Pass

(h) Spine - DRIZ



Pass level	Analysis value	Result
3.6m/s	3.04m/s	Pass

(l) Non auditory pressure

Fig. 9 Human body injury

5. 결 론

수류탄 및 지뢰에 따른 대전차의 보호 레벨을 평가하기 위하여 북대서양조약기구 NATO에서 발행한 AEP-55의 인체상해기준표를 지표로 하여 인체상해를 평가 및 분석한 결과 Head, Neck, Thorax, Spine, Femur, Tibia, Non auditory pressure induced injuries 등 인체의 총 6부위에 대하여 만족함을 알 수 있었다. 폭발 하중과 비슷한 충격이 가해지는 Drop test와 승객거동해석프로그램인 MADYMO를 이용한 해석의 조화로 결과에 신뢰성을 높였다. 따라서 선정된 Shock absorber의 성능이 만족함을 검증하였으며 이를 이용한다면 불의의 사고에도 탑승자의 생명을 보호할 수 있다는 결론을 도출하였다.

아직 산업에서는 엄청난 경비와 고가의 실험장비 등의 단점이 있는 Dummy를 이용한 실험법을 수행하고 있는 실정이다. 앞으로 이와 같은 컴퓨터 프로그램을 이용한 해석기법을 잘 정립하고 이를 이용한다면 실험법에 비해 적은 비용과 뛰어난 반복성, 실험을 통해서는 알기 힘든 복합적 관계 도출 등의 장점을 가진 해석법의 연구가 활발해질 것으로 기대된다.

REFERENCES

1. Kim, K. C., "Numerical investigation of the blast effect on structures," A Master's Thesis, KAIST, Republic of Korea, 2012.
2. Han, M. S. and Cho, J. U., "A Study on the Analysis of Thermal Durability due to the Configuration of Mortar," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 14, No. 6, pp. 69-76, 2015.
3. Jung, S. C., Park, T. S., Hur, N. S. and Kim, I. W., "CAE/CFD Analysis and Design of High-Pressure Drop Control Valve for Offshore Project," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 14, No. 5, pp. 42-49, 2015.
4. Han, M. S. and Cho, J. U., "A Study on Durability of Under Bar at Car through Structural and Fatigue Analysis," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 14, No. 2, pp. 38-44, 2015.
5. Kim, Y. J., "FE Analysis of Forging Process for Improving Tool Life in Hot Forging of CV Joint Outer Race," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 13, No. 3, pp. 56-62, 2014.