

외부 폭발에 의한 축소형 방폭문 변형 및 터널 내부 폭풍파 전파 거동의 수치해석

윤경재¹⁾ · 유요한^{*,1,2)}

¹⁾ 국방과학연구소 제4기술연구본부

²⁾ 과학기술연합대학원대학교 무기체계공학과

Numerical Analysis of the Subscale Blast Door Deformation and the Subsequent Blast Wave Propagation through the Tunnel by the External Explosion

Kyung Jae Yun¹⁾ · Yo-Han Yoo^{*,1,2)}

¹⁾ The 4th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

²⁾ Department of Weapon Systems Engineering, University of Science & Technology, Korea

(Received 8 July 2015 / Revised 26 October 2015 / Accepted 17 June 2016)

ABSTRACT

In this paper, we present the results of the numerical analysis employing CONWEP, LS-DYNA FSI(Fluid Structure Interaction), AUTODYN FSI, LS-DYNA ALE(Arbitrary Lagrange Eulerian) and combination of CONWEP and LS-DYNA ALE for blast door fracture and wave propagation through the tunnel by the external explosion. We compared the numerical analysis results with the subscale test data and selected combination of CONWEP and LS-DYNA ALE method as adequate data generation method for the FRM(Fast Running Model) software development. It is expected to save much time and costs by using the numerical simulation data for the various test conditions

Key Words : Numerical Analysis(수치해석), Subscale Blast Door(축소형 방폭문), Blast Wave Propagation(폭풍파 전파), Fast Running Model(신속평가모델)

1. 서론

장사정포진지를 포함한 북한의 많은 표적들은 방폭

문을 갖춘 터널 내에 설치되어있는 것으로 알려져 있다. 이러한 표적들에 대한 효율적 무기효과분석을 위하여 터널내부 폭발에 의한 방폭문 파괴 및 폭풍파 전파특성 연구용 FRM(Fast Running Model) 프로그램 개발이 필요하다. 방폭문 파괴 및 폭풍파 전파특성 연구용 FRM 프로그램이란 터널내부에서 탄두가 폭발했

* Corresponding author, E-mail: yyh1986@add.re.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

을 때, 방폭문 파괴 및 방폭문 너머로의 폭풍과 전파 특성을 빠른 시간 안에 계산할 수 있는 도구이다. 우리는 이 FRM 프로그램을 활용하여, 탄두 폭발에 의한 방폭문 파괴정도 및 터널 내부의 인원, 장비에 대한 피해를 빠른 시간 안에 예측함으로써, 탄두의 폭발 위력특성 및 표적피해효과를 신속, 정밀하게 분석할 수 있다¹⁻⁵⁾.

FRM 개발은 여러 가지 시험조건에 대한 결과를 DB (Data Base)로 구성한 후 이를 활용하여 추정모델을 만드는 방식으로 진행되며 DB는 실제시험 데이터와 고 신뢰도 전산해석 결과가 주로 사용된다. 정교한 FRM 개발을 위해서는 매번 시험을 통해서 신뢰성 있는 데이터를 확보하는 것이 가장 좋다. 그러나 많은 비용 및 시험의 위험요소 등으로 실제로는 매우 제한적인 시험 데이터만 얻을 수 있다. 그러므로 시험결과들을 제외한 나머지 DB 데이터는 고 신뢰도 전산해석기술을 활용하여 다양한 조건하에서 폭발에 의한 방폭문 파괴, 폭풍과 형성 및 전파현상에 대해 산출된 정량적 결과를 바탕으로 만들어진 DB를 활용하게 된다.

일반적으로 폭발, 폭풍과 전파 및 구조물과의 상호 작용 특성분석에는 실제 시험결과를 토대로 작성된 경험식을 활용한 CONWEP과 외연적 시간간분 유한요소(Explicit Time Integration Finite Element Method) 프로그램인 AUTODYN⁶⁾ 및 LS-DYNA⁷⁾ 그리고 CTH, ALE3D, ALEGRA, SHARC 등이 많이 사용되는 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 터널외부 폭발에 의한 방폭문 파괴 및 폭풍과 전파 현상에 대한 전산해석연구를 위하여 CONWEP, AUTODYN 및 LS-DYNA 그리고 CONWEP 과 LS-DYNA를 결합한 방법의 전산해석결과를 제시하고 그 결과를 시험결과와 비교분석하여 전산해석의 신뢰성을 확인하고 FRM 개발을 위한 DB 데이터 생성을 위한 도구로 적용가능한지 검토하였다.

2. 방폭문 파괴 및 폭풍과 전파 시험

방폭문 파괴 및 폭풍과 전파 현상에 대한 전산해석 연구와의 비교 분석을 위한 시험데이터를 얻기 위하여 방폭문을 제작, 설치한 후 방폭문 앞에서 기폭시켜 방폭문의 파괴 여부 및 폭풍과 전파 특성을 관찰하였다. 본 연구에서는 시험비용 감소를 위하여 원형시험 대신 1/3 크기의 축소형시험을 수행하였으며 이를 전

산해석 연구결과와 비교하였다. 축소형시험 구조물은 원형시험의 폭발특성 및 방폭문 변형거동을 최대한 실제와 유사하게 모사할 수 있도록 설계, 제작하여 사용하였다.

Fig. 1은 시험 준비 개념도를 나타낸다. 방폭문은 기존의 터널입구에 Bulk Head라는 구조물을 만들어 붙인 후 그 앞에 설치하였다. 폭발물은 주장약과 부스터, 기폭관으로 구성되어 있으며, 주장약으로는 12 kg의 bare TNT를 사용하였다. 주장약은 금속재 케이스 대신 얇은 합성수지 케이스를 사용하여 조립되었다. 폭발물의 설치위치는 방폭문 하단으로부터 30 cm 높이, 폭발물의 중심과 방폭문 사이의 거리는 15 cm인 지점이다.

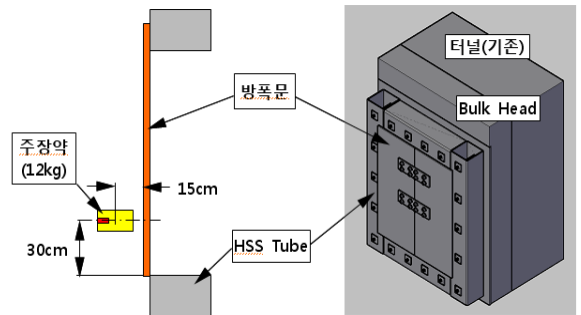


Fig. 1. Schematic diagram of test setup

Fig. 2는 시험 전 준비상황을 보여주고 있다. 좌측 그림은 터널 외부에서 본 형상이고 우측 그림은 터널 내부에서 본 형상이다. 좌측 그림의 하단부에서 방폭문 앞에 설치된 폭발물 설치 형상을 확인할 수 있으며 우측 그림의 바닥에 보이는 금속덮개는 압력센서 설치를 위한 구조물이다.



Fig. 2. Test setup

Fig. 3은 각도와 시점을 달리하여 폭발장면을 보여 주고 있다. 폭발에 의한 섬광의 크기와 형태를 Fig. 3에서 자세히 관찰할 수 있다.



Fig. 3. Scene of explosion

Fig. 4는 폭발시험이 완료된 후 회수된 방폭문의 형상을 보여준다. 좌측 그림은 터널내부의 하단부쪽에서 본 그림이고 우측 그림은 터널내부의 상단부쪽에서 본 그림이다. 방폭문이 폭발압으로 인해 래치설치 부근까지 파괴되면서 안쪽으로 ‘口’ 자 형태로 뜯겨져서 말려들어간 형태로 변형되었음을 알 수 있으며 파공부위의 크기는 폭 58 cm, 높이 128 cm 이다.



Fig. 4. Damaged blast door after testing

폭발물이 기폭된 후 방폭문이 파괴되었으며 폭발압이 방폭문을 넘어 터널 내부로 전파되었다. 터널 내부로의 폭발전파 이력은 바닥에 설치된 7개의 압력센서를 통하여 계측되었으며 이를 정리하여 Table 1에 나타내었다. Table 1에서 거리는 방폭문 후면에서 압력센서 설치위치까지의 거리를 의미하고 시간은 폭발 후 센서에 압력이 계측될 때까지 소요된 시간을 의미하며

압력은 계측된 압력이력의 최대치를 의미한다. 센서 1의 위치에서 폭발이 가장 크고 센서2에서 센서 7까지 압력 값이 점차적으로 작아짐을 알 수 있다.

Table 1. Peak pressure and arrival time according to the distance

Channel No.	Distance (cm)	Time (msec)	Peak Pressure (kPa)
1	81	0.76	930.8
2	96	0.91	618.4
3	111	1.11	469.2
4	126	1.31	346.9
5	141	1.54	293.7
6	156	1.76	246.7
7	201	2.61	184.5

방폭문 파괴 및 폭풍파 전파 시험을 통하여 방폭문 파괴 형상 및 변형거동 그리고 터널 내부 위치에 따른 폭발 도달 시간과 최대압력값들을 얻을 수 있었으며, 본 시험 데이터는 해석결과와의 분석 및 신뢰성 평가를 위한 기본 자료로 활용될 것이다.

3. 방폭문 파괴 및 폭풍파 전파 해석결과

FRM 개발을 위한 DB 데이터 생성을 위한 도구로 적용가능한지 검토하기 위하여 터널외부 폭발에 의한 방폭문 파괴 및 폭풍파 전파 현상에 대한 전산해석연구를 CONWEP, AUTODYN 및 LS-DYNA를 이용하여 수행한 후 연구 결과를 제시하고 그 결과를 시험결과와 비교분석하여 전산해석의 신뢰성을 확인하고자 한다.

전산해석에 사용된 형상, 재료 물성, 경계 조건 등은 가급적 시험조건과 일치하도록 모델링하였다.

3.1 CONWEP 해석결과

LS-DYNA에 포함된 CONWEP을 사용하여 방폭문 파괴 및 폭풍파 전파 현상에 대한 전산해석을 수행하여 시험결과와 비교하였다.

Fig. 5는 LS-DYNA에 포함된 CONWEP을 사용하여 얻어진 방폭문 변형 형상이다. Fig. 4의 시험결과와

비교하여 과공부위의 크기가 작으므로 실제 시험보다 폭발압력이 작게 작용되었음을 알 수 있다. 이것은 CONWEP이 개방공간에서 지면이외의 반사파가 고려되지 않아 발생하는 문제로 실제로 큰 압력이 더해지는 방폭문에 의한 반사파 효과를 생략하였기 때문이다.

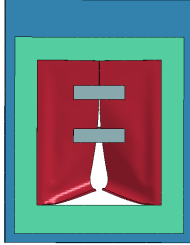


Fig. 5. Deformed blast door(CONWEP)

Fig. 6은 LS-DYNA에 포함된 CONWEP을 사용하여 얻어진 압력-시간 선도이다. 1번부터 4번 압력센서까지의 선도만 표시하였다. 최대압력이 점차 감소하는 것을 관찰할 수 있다. 정확한 최대압력값은 Table 2에서 확인할 수 있다. Table 2는 시험과 해석에서 최대압력에 도달하는 시간과 압력 값을 비교하고 있다.

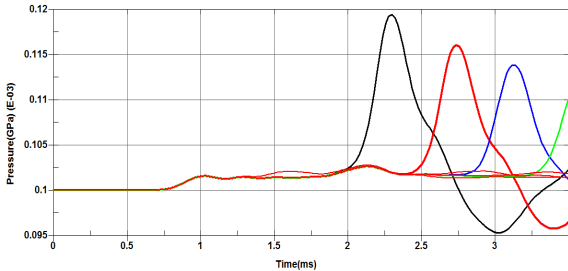


Fig. 6. Pressure-time plot(CONWEP)

Table 2. Comparison of test and computation(CONWEP)

Channel No.	Test		Computation	
	Time (msec)	Peak Pressure (kPa)	Time (msec)	Peak Pressure (kPa)
1	0.76	931	2.25	119
2	0.91	618	2.75	116
3	1.11	469	3.11	114
4	1.31	347	3.50	110

시험 결과에 비하여 CONWEP을 사용한 해석결과에서 최대 87 % 낮은 압력이 얻어지며 도달시간도 3배 정도 길다. 이것은 기본적으로 CONWEP에서 추천하는 사용기준을 벗어나기 때문으로 판단된다. CONWEP이 추천하는 폭약과의 거리의 제약조건은 아래 식 (1)과 같다. 아래 식에 본 시험의 폭약량과 거리를 적용하면 $Z = 0.065$ 로 조건을 만족하지 못한다.

$$0.147 (m/kg^{1/3}) < Z < 40 (m/kg^{1/3}) \quad (1)$$

$$Z = R/M^{1/3}$$

여기서, R은 폭약과의 거리이고 M은 폭약의 무게이다.

3.2 AUTODYN 해석결과

AUTODYN FSI(Fluid Structure Interaction) 방법을 사용하여 방폭문 파괴 및 폭풍과 전파 현상에 대한 전산 해석을 수행하여 시험결과와 비교하였다. 여기서 FSI 방법은 Coupling 방법을 의미한다.

Fig. 7은 AUTODYN FSI 방법 사용하여 얻어진 방폭문 변형 형상이다. Fig. 4의 시험결과와 비교하여 과공부위의 형상과 크기가 유사함을 알 수 있다.

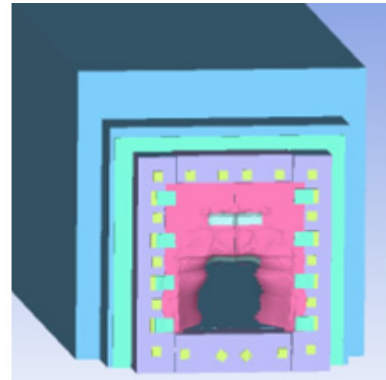


Fig. 7. Deformed blast door(AUTODYN)

Fig. 8은 AUTODYN FSI 방법을 사용하여 얻어진 압력-시간 선도이다. 1번부터 7번 압력센서까지의 선도를 표시하였다. 최대압력이 점차 감소하는 것을 관찰할 수 있다. 정확한 최대압력 값은 Table 3에서 확인할 수 있다. Table 3는 시험과 해석에서 최대압력에 도달하는 시간과 압력 값을 비교하고 있다. 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

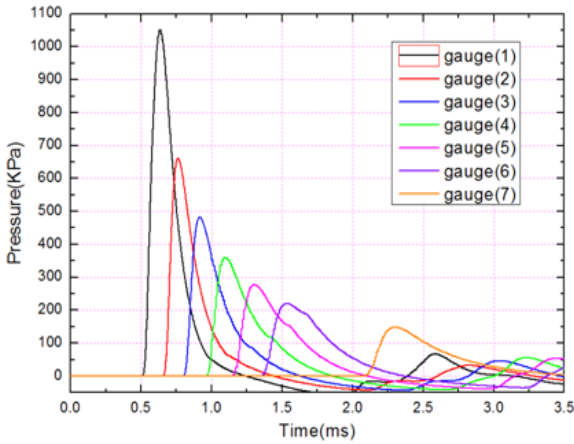


Fig. 8. Pressure-time plot(AUTODYN)

Table 3. Comparison of test and computation (AUTODYN)

Channel No.	Test		Computation	
	Time (msec)	Peak Pressure (kPa)	Time (msec)	Peak Pressure (kPa)
1	0.76	931	0.63	1,051
2	0.91	618	0.76	661
3	1.11	469	0.92	482
4	1.31	347	1.10	360
5	1.54	294	1.37	278
6	1.76	247	1.59	221
7	2.61	185	2.32	149

3.3 LS-DYNA 해석결과

LS-DYNA ALE(Arbitrary Lagrange Eulerian) 및 LS-DYNA FSI 방법을 사용하여 방폭문 파괴 및 폭풍파 전파 현상에 대한 전산해석을 수행하여 시험결과와 비교하였다.

Fig. 9는 LS-DYNA ALE 및 FSI 방법 사용하여 얻어진 방폭문 변형 형상이다. Fig. 4의 시험결과와 비교하여 파공부위의 형상과 크기가 유사함을 알 수 있으며 ALE 및 FSI 방법 사용하여 얻어진 방폭문 변형 형상에 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

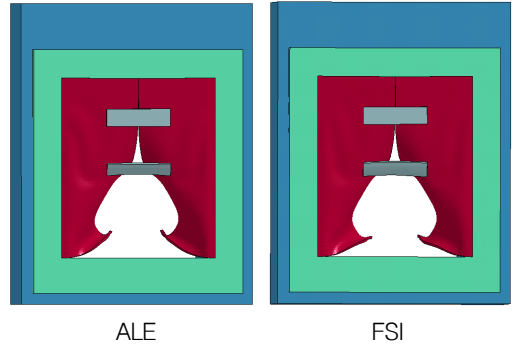


Fig. 9. Deformed blast door(LS-DYNA)

Fig. 10과 Fig. 11은 각각 LS-DYNA ALE 및 FSI 방법을 사용하여 얻어진 압력-시간 선도를 표시하고 있다. 1번부터 7번 압력 센서까지의 선도를 표시하였다. 최대압력이 점차 감소하는 것을 관찰할 수 있다. 정확한 최대압력 값은 Table 4와 Table 5에서 각각 확인할 수 있다. Table 4와 Table 5는 시험과 해석에서 최대압력에 도달하는 시간과 압력 값을 비교하고 있다. 비교적 잘 일치함을 알 수 있으며 LS-DYNA ALE와 FSI 결과 간에 큰 차이가 없다. 그러나 1번 압력센서 위치에서 얻어진 최대 압력 값은 AUTODYN FSI 방법에서 얻어진 최대 압력 값보다 시험 값과의 차이가 큼을 알 수 있다

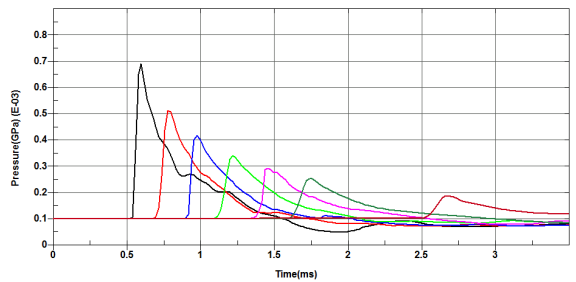


Fig. 10. Pressure-time plot(LS-DYNA ALE)

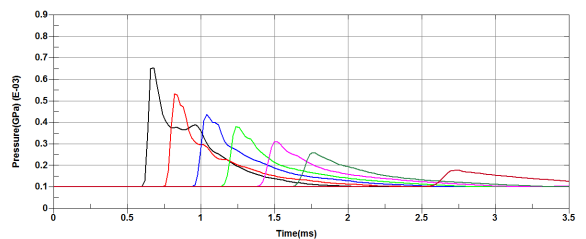


Fig. 11. Pressure-time plot(LS-DYNA FSI)

Table 4. Comparison of test and computation (LS-DYNA ALE)

Channel No.	Test		Computation	
	Time (msec)	Peak Pressure (kPa)	Time (msec)	Peak Pressure (kPa)
1	0.76	931	0.60	690.8
2	0.91	618	0.78	512.4
3	1.11	469	0.98	419.2
4	1.31	347	1.22	340.1
5	1.54	294	1.46	294.5
6	1.76	247	1.74	253.8
7	2.61	185	2.68	187.5

Table 5. Comparison of test and computation (LS-DYNA FSI)

Channel No.	Test		Computation	
	Time (msec)	Peak Pressure (kPa)	Time (msec)	Peak Pressure (kPa)
1	0.76	931	0.66	650.8
2	0.91	618	0.82	534.2
3	1.11	469	1.04	436.9
4	1.31	347	1.24	381.4
5	1.54	294	1.50	310.3
6	1.76	247	1.76	259.7
7	2.61	185	2.72	179.1

3.4 LS-DYNA와 CONWEP의 결합 해석결과

CONWEP의 경우에는 많은 축적된 폭발성능 시험데이터를 DB로 하여 그에 상응하는 해석결과를 다른 정밀해석 방법에 비해 매우 빠른 시간 내에 제시해주는 장점이 있다. 반면에 LS-DYNA 및 AUTODYN과 같은 정밀해석 코드는 정확한 해석결과를 제시하는 반면 해석시간이 매우 많이 소요되는 단점이 있다.

계산의 효율성을 증대하기 위하여 앞에 설명한 두 가지 방법의 장점을 결합한 방법의 적용을 고려할 필

요가 있다. 이 방법은 CONWEP과 LS-DYNA ALE 기법을 결합하여 사용하는 방법(이하 결합방법)으로 개방공간에서는 CONWEP의 기법을 사용하고 그 이후 폭발이 방폭문에 도달하여 유체구조연성 문제를 해석할 때는 LS-DYNA ALE를 적용하는 방법이다. 결합해석 방법은 CONWEP과 ALE 기법의 장점을 모두 취함으로써 비교적 빠른 시간 내에 정밀해석결과와 유사한 결과를 제시해줄 것으로 예상된다.

폭약과 방폭문 사이의 거리와 폭약량이 본 축소형 시험과 다른 경우에 대한 DB 데이터를 전산해석을 통하여 구성할 필요가 있으며 이 경우에 대한 적용방법 선정을 위하여 CONWEP, 결합방법, LS-DYNA ALE 세 가지 해석방법을 비교하였다. 앞에서 살펴본 바와 같이 본 축소형 시험에 CONWEP의 제약조건 식을 적용하면 $Z = 0.065$ 로 조건을 만족하지 못하므로 CONWEP의 제약조건 식을 만족하는 새로운 해석조건을 설정하여 이 문제에 대한 CONWEP, 결합방법, LS-DYNA ALE 세 가지 해석방법의 결과를 비교하고자 한다. 이를 위하여 설정된 새로운 해석조건은 폭약과의 거리는 1 m이고 폭약의 무게는 15 kg이다. 이 때 $Z = 0.4$ 로 CONWEP의 제약조건 식을 만족한다. 방폭문의 최대 변형 시 변형 형상을 Fig. 12에 나타내었다.

Fig. 12를 통해 알 수 있듯이 CONWEP의 해석결과는 결합방법, LS-DYNA ALE 해석결과에 비해 많이 다른 방폭문 변형형상을 보이고 있다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 폭약과의 거리가 가깝고 유체구조연성 문제에는 정확하지 않기 때문이다. 반면에 결합방법과 LS-DYNA ALE의 해석결과는 매우 유사한 방폭문 변형형상을 보여주고 있다.

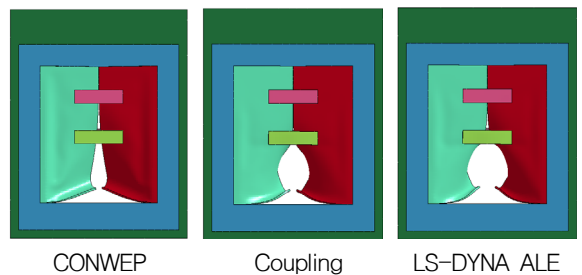


Fig. 12. Deformed blast door

Table 6에 CONWEP, 결합방법, LS-DYNA ALE 세 가지 해석방법의 해석결과를 비교하였다. Table 6에서 시간과 최대압력값은 Table 1의 센서 1 위치에서 얻어진

값이다. Table 1의 결과를 살펴보면 CONWEP의 해석결과는 결합방법, LS-DYNA ALE 해석결과에 비해 많이 다름을 알 수 있다. 최대압력값이 3배정도 작고, 도달시간은 2배 이상 길다. 반면에 결합방법과 LS-DYNA ALE의 해석결과는 매우 유사한 최대압력값과 도달시간을 보여준다. 그러나 결합방법을 사용하는 경우 계산시간이 LS-DYNA ALE에 비해 약 4.5배 이상 단축됨을 알 수 있다. 이상의 연구결과를 기반으로 폭약과 방폭문 사이의 거리와 폭약량의 다양한 조합에 대한 DB 데이터 생성을 위하여 CONWEP과 LS-DYNA ALE 기법을 결합하여 사용하는 해석방법을 적용하였다.

Table 6. Comparison of three methods(CONWEP, Coupling, LS-DYNA ALE)

Method	Computation time (hours)	Time (msec)	Peak Pressure (kPa)
CONWEP	8	2.30	120
Coupling	37	0.92	293
LS-DYNA ALE	178	0.87	360

4. 결론

터널내부 폭발에 의한 방폭문 파괴 및 폭풍과 전파 현상에 대한 전산해석연구를 위하여 CONWEP, AUTODYN FSI, LS-DYNA FSI, LS-DYNA ALE 그리고 CONWEP과 LS-DYNA ALE를 결합한 방법의 전산해석 결과를 제시하고 그 결과를 시험결과와 비교분석하여 전산해석의 신뢰성을 확인한 결과 해석결과의 정확성을 유지하면서 계산시간을 절감할 수 있는 CONWEP

과 LS-DYNA ALE를 결합한 방법이 FRM 개발을 위한 DB 데이터 생성용 최적도구로 판단되었다.

본 연구에서 제시된 CONWEP과 LS-DYNA ALE를 결합한 전산해석기법을 이용하여 FRM 프로그램 개발에 필요한 신뢰성 있는 해석데이터들을 제공하였으며, 이 데이터를 이용하여 개발된 FRM 프로그램은 향후 갱도 내에서의 탄두폭발위력 특성평가, 갱도진지 침투탄두 설계 및 갱도진지표적 무력화를 위한 무기체계 운용계획에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] T. Ngo, P. Mendis, A. Gupta and J. Ramsay, "Blast Loading and Blast Effects on Structures-an Overview," Electronic Journal of Structural Engineering, Vol. 7, pp. 76-91, 2007.
- [2] S. M. Liang, J. S. Wang and H. Chen, "Numerical Study of Spherical Blast-Wave Propagation and Reflection," Shock waves Vol. 12, No. 1, pp. 59-68, 2002.
- [3] O. Igra, G. Hu, J. Falcovitz and W. Heilig, "Blast Wave Reflection from Wedges," Journal of Fluids Engineering," Vol. 125, No. 3, pp. 510-519, 2003.
- [4] D. Cheng et al, "Numerical Simulation of Near Field Explosion," Engineering Structure, Vol. 16, No. 1, pp. 61-67, 2013.
- [5] Morris R. Driels, "Weaponeering: Conventional Weapon System Effectiveness," 2nd Edition, AIAA Inc. Virginia, 2013.
- [6] AUTODYN User's & Theory Manual.
- [7] LS-DYNA User's & Theory Manual.