Water gel의 밀도 및 두께변화에 따른 폭발압력의 저감

Mitigation of Blast Pressure according to the Variation of Density and Thickness of the Water Gel

정우진*

Jung, Woo-Jin

Abstract

The test blast was carried out in order to investigate the mitigation effect of blast pressure by the water gel for a barrier material at close range from TNT explosive. The mitigation effects of the blast pressure by changing the density and thickness of the water gel were verified. At close range from TNT explosive, as the low scaled distance, the mitigation effect of the peak overpressure by water gel was greater than that of the high scaled distance, and decreased with increasing the scaled distance. Furthermore, the mitigation degree of the scaled impulse by changing the density and thickness of water gel showed the same trend as the peak overpressure.

Key words : water gel, blast pressure, TNT explosive, mitigation effect

요 지

TNT폭약 근거리에서의 완충재에 의한 직접적인 폭풍압 저감 효과에 대해서 실험적으로 조사하였다. 완충재로서 water gel을 사용하였으며, 완충재의 밀도 및 두께를 달리하여 폭풍압 저감 효과를 확인하였다. 폭원 근거리에서는 완충재에 의한 피크 과압의 저감 효과가 크며 환산거리가 증가함에 따라 저감 효과가 감소하였다. 또한 완충재의 밀도 및 두께변화에 따른 환산충격량의 저감 정도는 피크 과압의 저감 정도와 동일한 경향이 나타났다.

핵심용어 : water gel, 폭발압력, TNT폭약, 저감효과

1. 서 론

폭발물을 사용한 폭탄테러나 에너지 물질의 폭발사고의 경우, 폭풍압이나 소음이 주변으로 전파되어 간다. 이 경우 폭풍압이나 소음이 주변의 건물과 인체에 막대한 피해를 입힐 수 있기 때문에 폭발영향에 대한 정확한 평가 및 폭풍압의 저감은 중요하며, 그 동안 다수의 연구가 수행되어 왔다. Baker(1973)와 Kinney(1962)는 야외에서 기준폭약으로서 TNT를 공중에서 폭발시켜 폭풍압을 측정하였고, Kingery et al.(1964)과 Arai et al.(2011)은 TNT를 지표면에서 폭발시켜 폭풍압을 측정하여 TNT의 기준곡선을 보고하였다. 또한 폭발 챔버 내에서의 폭발실험도 수행되어, Matsunaga et al.(2000)은 펜토라이트폭약의 폭풍압을 TNT와의 비로 환산하는 방법을 제안하였고, Arai et al.(2011)은 소량의 TNT를 사용한 실험을 통해 TNT의 기준곡선을 제안하였다. 이러한

기초연구와 함께 폭풍압·소음을 효과적으로 저감시키는 연구도 수행되어 왔다. 모래를 이용한 폭발음의 저감(Maeda et al., 1993), 실스케일 콘크리트 벽에 의한 폭발압력의 저감(Homae et al., 2008), 철근콘크리트 패널의 방폭성능 향상(하주형 등, 2010), agar gel barrier 및 gelatine gel barrier에 의한 LPG의 폭발압력 완화(박달재 등, 2011; 박달재 등, 2012)와 같은 연구가 수행되어 왔다. 그러나 지금까지는 폭발물 근거리에서의 직접적인 폭풍압 저감에 관한 연구는 충분하지 이루어지고 있지 않다. 본 연구에서는 TNT폭약 근거리에서의 완충재에 의한 직접적인 폭풍압 저감 효과에 대해서 실험적으로 조사하였다. 완충재로서 water gel을 사용하여 완충재의 밀도 및 두께를 달리함으로써 완충재의 밀도 및 두께변화에 따른 폭풍압 저감 효과를 확인하였으며, 완충재의 적정 밀도 및 두께를 제시하였다.

*교신저자. 정회원. (주)우진엔지니어링 부장(Tel: +82-42-671-3200, Fax: 82-42-635-6332, E-mail: deto90@paran.com)
Corresponding Author: Member, Director, Woojin Engineering Co., Ltd.

2. 실험개요

2.1 사용시료

시료폭약은 약량의 차이에 의한 완충재의 두께효과 및 밀도 효과를 확인하기 위하여 0.025, 0.05, 0.1 kg 3종류의 TNT폭약을 높이와 직경이 동일한 원통형 아크릴 용기에 완충재와 함께 넣어 제작하였다. 아크릴 용기는 0.1, 0.2 및 0.3 m 직경의 3 종류의 용기를 사용하여 동일 밀도($400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$)의 완충재의 두께를 변화시킴으로써 두께효과를 확인하였다. 완충재의 폭약으로부터의 두께는 Hopkinson 축척법(Kinney et al., 1985)을 사용하여 표현할 수 있는데, 폭약의 약량과 폭풍압의 측정위치가 달라도 동일한 환산거리(scaled distance)에서는 동일한 피크 과압(peak overpressure)과 환산충격량(scaled impulse)이 얻어지게 된다. 환산거리 $SD(\text{m}\cdot\text{kg}^{-1/3})$ 는 다음의 식으로 나타낸다.

$$SD = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (1)$$

여기서 R 은 폭약으로부터의 거리(m), W 는 폭약의 약량(kg)이다.

같은 방법으로 폭약의 약량과 완충재의 두께가 달라도 환산두께(scaled thickness)가 동일하면 동일한 피크 과압과 환산충격량이 얻어지게 된다. 환산두께 $ST(\text{m}\cdot\text{kg}^{-1/3})$ 는 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$ST = \frac{1/2(D-d)}{W^{1/3}} \quad (2)$$

여기서 D 는 용기의 직경(m), d 는 폭약의 직경(m), W 는 폭약의 약량(kg)이다.

본 연구의 완충재의 폭약으로부터의 환산두께는 Table 1에 나타난 것과 같이 최소치가 $0.04 \text{ m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$ (TNT 0.1 kg 기폭시의 완충재 두께 0.0185 m)이며, 최대치는 $0.44 \text{ m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$ (TNT 0.025 kg 기폭시 완충재 두께 0.13 m)이다.

두께 2 mm의 아크릴 용기는 완충재를 원통형으로 유지하고 폭발 시 파괴가 용이하며, 또한 폭풍압에 영향을 거의 미치지 않고 투명하여 폭약시료의 제작이 용이하다는 장점이 있다. 완충재는 4 종류의 밀도를 갖는 water gel을 사용하여 밀도의 차이에 따른 폭풍압 저감 효과를 확인하였다. water gel은 젤화제인 폴리아크릴산 나트륨(sodium polyacrylate)을 발포스티롤(foam polystyrene)의 미소 구체(직경 1mm)와 혼합하여 제작하였으며, 4 종류의 혼합비를 사용하여 water gel의 밀도를 변화시켰다. 또한 비교를 위해 완충재를 사용하지 않고 TNT만을 폭발시킨 실험도 실시하였다(이하 기준실험). Table 1에 실험조건을 나타내었다.

2.2 실험방법

TNT 폭약의 폭발 시에 발생하는 폭풍압은 피에조 압력센서를 사용한 일반적인 실험방법으로 측정하였다. Fig. 1(a) 및 (b)에 나타난 것처럼 시료폭약은 폭약의 중심이 바닥에서

Table 1. Experimental conditions

Barrie materials	Container diameter, D [m]	Barrie thickness, t [m]	Barrier scaled thickness, ST [$\text{m}\cdot\text{kg}^{-1/3}$]	Barrier material weight [kg]	Barrier material density [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	TNT weight [kg]	TNT density [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
None	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.0254	512.0
water gel	0.1	0.03	0.1	0.07	100	0.0252	516.9
water gel	0.1	0.03	0.1	0.29	400	0.0251	514.9
water gel	0.1	0.03	0.1	0.52	700	0.0254	521.0
water gel	0.1	0.03	0.1	0.74	1000	0.0252	516.9
water gel	0.2	0.08	0.27	2.49	400	0.0253	519.0
water gel	0.3	0.13	0.44	8.46	400	0.0250	512.8
None	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.0503	512.6
water gel	0.1	0.025	0.07	0.07	100	0.0504	513.6
water gel	0.1	0.025	0.07	0.27	400	0.0501	510.6
water gel	0.1	0.025	0.07	0.48	700	0.0506	515.7
water gel	0.1	0.025	0.07	0.69	1000	0.0503	512.6
water gel	0.2	0.075	0.2	2.47	400	0.0504	513.6
water gel	0.3	0.125	0.34	8.44	400	0.0503	512.6
None	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.1010	514.6
water gel	0.1	0.0185	0.04	0.06	100	0.1000	509.5
water gel	0.1	0.0185	0.04	0.24	400	0.1010	514.6
water gel	0.1	0.0185	0.04	0.41	700	0.1010	514.6
water gel	0.1	0.0185	0.04	0.59	1000	0.1020	519.6
water gel	0.2	0.0685	0.15	2.43	400	0.1020	519.6
water gel	0.3	0.1185	0.26	8.40	400	0.1000	509.5

Fig. 1. Experimental setup for blast pressure measurement

Fig. 2. Examples of pressure profiles for 0.05 kg of TNT: (a) Without water gel, (b) With water gel, thickness 0.02 m (sensor position : 1.5 m from charge at 22.5°)

1 m 높이가 되도록 목재봉 위에 설치하였으며, 폭약의 중심에 설치한 순발전기노관 1개의 폭발력으로써 폭약을 기폭시켰다. 폭풍압을 계측하기 위해 피에조 압력센서(PCB Piezotronics, 137A23 및 137A22)를 폭약으로부터 1, 1.5, 2, 2.5, 3 m의 위치에 폭약의 중심과 동일한 높이가 되도록 설치하였다(Fig. 1(b), (c)). 원통형의 폭약을 사용하는 경우, 상하 방향을 제외하면 방향에 따른 폭풍압의 차이는 없으므로 압력센서 상호간의 영향을 받지 않도록 압력센서를 동일 선상에 설치하지 않고 그림과 같이 0, 22.5, 45, 67.5, 90°에 각각 설치하였다. 압력센서를 설치한 지점의 폭약으로부터의 환산거리는 최소치가 $2.15 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ (TNT 0.1 kg 기폭시 1 m 위치)이며, 최대치는 $10.26 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ (TNT 0.025 kg 기폭시 3 m 위치)이다.

압력센서의 신호는 시그널 컨디셔너를 거쳐 데이터 레코더에 기록하였으며, 계측된 압력파형 데이터로부터 피크 과압, 환산충격량을 구하였다. 피크 과압은 계측된 압력 파형중 가

장 높은 값을 사용하였으며, 환산충격량은 압력 파형에서 압력이 상승하는 순간부터 최대값을 지나 0으로 되는 순간까지를 시간으로 적분하여 구하였다. Fig. 2에 시간에 따른 폭풍압의 변화를 나타내었다. 그림은 폭약의 중심과 22.5°방향으로 1.5 m 위치에서 계측한, 동일 폭약을 사용하고 완충재를 사용하지 않은 기준실험의 경우와 0.02 m 두께의 완충재를 사용한 경우의 폭풍압을 비교한 것이다. 완충재를 사용함으로써 피크 과압의 감소, 폭풍압 도달의 지연 및 피크 압력이 감쇠하는데 소요되는 시간도 증가하는 것을 알 수 있다.

3. 결과 및 분석

3.1 Water gel의 밀도 변화에 따른 폭풍압 저감 효과

Fig. 3에 TNT 0.025 kg 폭발시의 피크 과압과 완충재의 밀도와와의 관계를 각각의 환산거리에서 나타내었다. Fig. 3(a)에서 밀도 $0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 은 완충재를 사용하지 않고 TNT만을 폭

Fig. 3. Relation between peak overpressure and density of water gel: (a) Peak overpressure, (b) Ratio to standard data in peak overpressure (TNT weight : 0.025 kg)

발시킨 기준 실험의 피크 과압이며, 피크 과압은 폭약으로부터 근거리 일수록 높은 값을 보이며 환산거리가 커질수록 감소되었다. 또한 4 종류의 모든 완충재의 밀도에서 피크 과압이 감소하였다. 이와 같이 완충재에 의해 폭풍압이 감소되는 이유는, 폭약의 폭발에너지의 일부는 완충재의 충격 압축, 상변화, 가열 및 운동에너지로서 완충재에 작용하게 되어 폭풍압으로서 주위에 전파하는 양이 감소하게 된다. 특히 본 실험에 사용한 water gel과 같이 완충재가 기포를 함유하는 저밀도 재료인 경우, 기포는 작은 압력에도 간단하게 파괴되므로 충격 압축시의 완충재의 체적변화에 많은 폭발에너지가 소비된다. 따라서 완충재에 의해서 폭풍압 저감 효과가 나타나게 되는 것으로 사료된다.

Fig. 3(b)는 완충재를 사용한 경우의 피크 과압을 기준 실험의 피크 과압으로 나눈 값으로, 완충재에 의한 폭풍압의 저감 정도를 나타낸 것이다. 그림에서 완충재의 밀도가 증가할수록 모든 환산거리에서의 피크 과압이 감소하였다. 이와 같이 밀도의 변화에 의해 피크 과압의 저감 정도가 달라지는 이유는 완충재를 비산시키는 운동에너지의 차이 때문으로 사료된다. 즉, 밀도가 작아 가벼운 완충재의 경우에는 폭발에너지가 완충재의 운동에너지로 적게 소비되며, 밀도가 커서 상대적으로 무거운 완충재의 경우에는 완충재의 운동에너지로 상대적으로 많이 소비된다. 결과적으로 충격 압축에 의해 완충재의 체적변화에 많은 폭발에너지가 소비되는 저밀도의 가벼운 완충재의 경우보다, 완충재를 비산시키는데 많은 폭발에너지가 소비되는 고밀도의 무거운 완충재의 경우에 폭약의 폭발에너지가 더 많이 소비되어, 완충재의 밀도가 증가할수록 폭풍압의 저감 효과가 커지는 것으로 사료된다.

피크 과압은 완충재의 밀도 100 kg·m⁻³에서는 모든 환산거리에서 크게 감소하지 않았으며, 밀도 400 kg·m⁻³에서는 현저하게 감소하였다. 또한, 밀도 700 kg·m⁻³ 이상에서는 밀도가 증가하여도 피크 과압의 저감 효과는 크게 증가하지 않았다. 이것은 피크 과압의 저감 효과가 크지 않은 밀도 100 kg·m⁻³에서는 완충재의 체적변화 및 비산에 소비되는 폭발에너지가 모두 적었으며, 저감 효과가 큰 밀도 400 kg·m⁻³에서는 체적변화 및 비산 모두에 많은 폭발에너지가 소비되었고, 저감

효과가 크게 변화하지 않는 그 이상에서는 밀도가 커져서 체적변화보다는 비산에 많은 폭발에너지가 소비된 것으로 사료된다.

환산거리 3.42 m·kg^{-1/3}에서 모든 밀도의 완충재는 다른 환산거리의 경우보다 피크 과압의 저감 정도가 상대적으로 크게 나타났으며, 환산거리가 증가하게 되면 완충재의 밀도가 증가함에 따라 피크 과압의 저감 정도가 완만하게 변화하였다. 이것은 TNT 0.025 kg과 같이 폭약의 약량이 적은 경우, 폭원 근거리에서는 완충재에 의한 피크 과압의 저감 효과가 크며 원거리로 갈수록 저감 효과가 적어진다는 것을 의미한다.

Fig. 4에 TNT 0.05 kg 폭발시의 피크 과압과 완충재의 밀도와의 관계를 각각의 환산거리에서 나타내었다. TNT 0.025 kg의 경우와 마찬가지로 피크 과압은 폭약으로부터 근거리 일수록 높은 값을 보이며 환산거리가 커질수록 감소되었다. 또한 4 종류의 모든 완충재의 밀도에서 피크 과압이 감소하였다.

Fig. 4(b)에 나타낸 것과 같이 완충재의 밀도가 증가할수록 모든 환산거리에서의 피크 과압이 감소하였다. 또한 피크 과압은 완충재의 밀도 100 kg·m⁻³에서는 모든 환산거리에서 크게 감소하지 않았고, 밀도 400, 700 kg·m⁻³까지는 현저하게 감소하였으며, 밀도 1000 kg·m⁻³에서는 밀도 증가로 인한 피크 과압의 저감 정도는 크게 변화하지 않았다. 즉, TNT 0.025 kg의 경우보다 밀도효과가 증가하였다.

환산거리 2.71, 4.07 m·kg^{-1/3}에서 모든 밀도의 완충재는 다른 환산거리의 경우보다 피크 과압의 저감 정도가 상대적으로 크게 나타났으며, 환산거리가 증가하게 되면 완충재의 밀도가 증가함에 따른 피크 과압의 저감 정도가 완만하게 변화하였다. 이것은 TNT 0.025 kg의 경우보다 폭약의 약량이 증가함에 따라 완충재에 의한 피크 과압의 저감 효과가 크게 나타나는 거리도 증가하는 것을 의미한다. 이와 같이 폭약의 약량이 증가함에 따라 폭풍압의 저감 효과가 크게 나타나는 거리가 증가하는 이유는, 폭풍압의 감소는 폭원 근방에서는 거리의 1.5 승, 원거리에서는 거리의 1 승에 반비례하며 (Japan explosives society, 1989), 폭약의 폭발에너지가 느리

Fig. 4. Relation between peak overpressure and density of water gel: (a) Peak overpressure, (b) Ratio to standard data in peak overpressure (TNT weight : 0.05 kg)

Fig. 5. Relation between peak overpressure and density of water gel: (a) Peak overpressure, (b) Ratio to standard data in peak overpressure (TNT weight : 0.1 kg)

게 방출되면 원거리에서의 폭풍압 감소율은 더욱 작아지게 된다. 따라서 폭약의 약량이 증가하면 폭약의 폭발에너지가 완충재를 통과한 후 공기중에 방출되는 속도가 상대적으로 커져 폭풍압의 저감 효과가 크게 나타나는 거리가 증가하는 것으로 판단된다.

Fig. 5에 TNT 0.1 kg 폭발시의 피크 과압과 완충재의 밀도와의 관계를 각각의 환산거리에서 나타내었다. TNT 0.025, 0.05 kg의 경우와 마찬가지로 피크 과압은 폭약으로부터 근거리 일수록 높은 값을 보이며 환산거리가 커질수록 감소되었다. 또한 4 종류의 모든 완충재의 밀도에서 피크 과압이 감소하였다.

Fig. 5(b)에 나타낸 것과 같이 완충재의 밀도가 증가할수록 모든 환산거리에서의 피크 과압이 감소하였다. 또한 피크 과압은 완충재의 밀도 100 kg·m⁻³을 제외한 다른 3 종류의 밀도에서 모든 환산거리에서 밀도가 증가함에 따라 크게 감소하였으며, 3 종류의 TNT 약량 중에서 밀도효과가 가장 크게 나타났다. 이것은 적은 약량에서는 완충재의 밀도가 작아도 폭풍압 저감에 충분한 효과를 발휘하지만 약량이 증가함에 따라 완충재의 밀도도 함께 증가해야 하는 것을 의미한다.

5 종류의 모든 환산거리에서 모든 밀도의 완충재는 피크

과압의 감소 정도가 크게 나타났다. 이것은 TNT 0.05 kg의 경우와 마찬가지로 폭약의 약량이 증가함에 따라 완충재에 의한 피크 과압의 저감 효과가 크게 나타나는 거리도 증가하는 것을 의미한다.

Fig. 6은 3 종류 약량의 TNT 폭발시의, 각각의 환산거리에 대응하는 완충재에 의한 피크 과압 및 환산충격량의 저감 정도를 모두 나타낸 것이다. 환산거리는 TNT 0.025 kg에서 3.42~10.26 m·kg^{-1/3}, 0.05 kg에서 2.71~8.14 m·kg^{-1/3}, 0.1 kg에서 2.15~6.46 m·kg^{-1/3}로 나타났으며, TNT의 약량이 작을수록 높고 넓은 범위의 환산거리가 나타났다. 또한 완충재의 밀도변화에 따른 피크 과압 및 환산충격량의 저감 정도는, TNT 0.1 kg의 환산거리 2.15 m·kg^{-1/3}, 0.05 kg의 환산거리 2.71 m·kg^{-1/3} 등과 같은 낮은 환산거리 범위에서는 크게 나타나며, TNT 0.025 kg의 환산거리 8.55, 10.26 m·kg^{-1/3} 등과 같은 높은 환산거리 범위에서는 낮게 나타나는 것을 알 수 있다. 즉, 환산거리가 커질수록 완충재에 의한 피크 과압 및 환산충격량의 저감 효과는 동일하게 작게 나타난다. 이와 같이 환산거리가 증가함에 따라 폭풍압의 저감 효과가 작게 나타나는 이유는, 위에서 서술한바와 같이 폭원으로부터의 거리의 증가 및 느린 폭발에너지 방출속도에 따른 폭풍압 감소율

Fig. 6. Influence of density of water gel on blast pressure of TNT: (a) Ratio to standard data in peak overpressure, (b) Ratio to standard data in scaled impulse

의 감소와 더불어, 폭약이 공중에서 폭발하는 경우, 지면에서 반사되어 발생한 반사파가 최초의 입사파와 중첩되어 폭풍압이 증가하게 되는데 이러한 반사파와 입사파의 중첩현상은 폭원으로부터 거리가 증가할수록 현저하게 나타난다. 따라서 폭풍파가 완충재를 통과하면서 폭발에너지의 공기중으로의 방출속도가 감소되었으며, 반사파와 입사파의 중첩현상이 폭원으로부터 보다 원거리에서 나타나, 상대적으로 원거리에서의 폭풍압 저감 효과가 작게 나타난 것으로 판단된다.

3.2 water gel의 두께 변화에 따른 폭풍압 저감 효과

Fig. 7에 TNT 0.025 kg 폭발시의 피크 과압과 완충재의 환산두께와의 관계를 각각의 환산거리에서 나타내었다. Fig. 7(a)에서 환산두께 $0 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 은 완충재를 사용하지 않고 TNT 만을 폭발시킨 기준 실험의 피크 과압이며, 폭약 주변의 완충재의 환산두께가 증가할수록 모든 환산거리에서의 피크 과압이 감소되었다. 이와 같이 완충재의 밀도를 동일하게 유지하고 두께만 변화하는 경우는 완충재의 질량만 변화하는 것으로서 위에서 서술한 바와 같이 완충재의 충격 압축, 상변화, 가열 및 운동에너지 등으로서 모든 완충재에서 소비되는 폭약의 폭발에너지가 완충재의 질량과 함께 증가하게 되어 폭

풍압으로서 주위에 전파하는 양이 급격하게 감소하게 되는 것이다.

Fig. 7(b)는 완충재를 사용한 경우의 피크 과압을 기준 실험의 피크 과압으로 나눈 값으로, 완충재에 의한 폭풍압의 저감 정도를 나타낸 것이다. 피크 과압은 완충재의 모든 환산거리에서 환산두께가 증가함에 따라 기준실험의 $0.32 \sim 0.84$ 로 감소되었으며, 밀도변화의 경우와 마찬가지로 환산거리 $3.42 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 에서 다른 환산거리의 경우보다 저감 정도가 크게 나타났다.

Fig. 8에 TNT 0.05 kg 폭발시의 피크 과압과 완충재의 환산두께와의 관계를 각각의 환산거리에서 나타내었다. TNT 0.025 kg의 경우와 마찬가지로 완충재의 환산두께가 증가할수록 모든 환산거리에서의 피크 과압이 감소하였다. 또한 밀도 효과의 경우와 동일하게 환산거리 $2.71, 4.07 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 에서 모든 환산두께의 완충재는 다른 환산거리의 경우보다 피크 과압의 저감 정도가 상대적으로 크게 나타났다.

Fig. 9에 TNT 0.1 kg 폭발시의 피크 과압과 완충재의 환산두께와의 관계를 각각의 환산거리에서 나타내었다. 완충재의 환산두께가 증가할수록, 밀도효과와 마찬가지로 모든 환산거리에서의 피크 과압이 감소하였다.

Fig. 7. Relation between peak overpressure and scaled thickness of water gel: (a) Peak overpressure, (b) Ratio to standard data in peak overpressure (TNT weight : 0.025 kg)

Fig. 8. Relation between peak overpressure and scaled thickness of water gel: (a) Peak overpressure, (b) Ratio to standard data in peak overpressure (TNT weight : 0.05 kg)

Fig. 9. Relation between peak overpressure and scaled thickness of water gel: (a) Peak overpressure, (b) Ratio to standard data in peak overpressure (TNT weight : 0.1 kg)

Fig. 10. Influence of scaled thickness of water gel on blast pressure of TNT: (a) Ratio to standard data in peak overpressure, (b) Ratio to standard data in scaled impulse

Fig. 10은 3 종류 약량의 TNT 폭발시의, 각각의 환산두께에 대응하는 완충재에 의한 피크 과압 및 환산충격량의 저감 정도를 모두 나타낸 것이다. 환산두께는 TNT 0.025 kg에서 $0.1 \sim 0.44 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$, 0.05 kg에서 $0.07 \sim 0.34 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$, 0.1 kg에서 $0.04 \sim 0.26 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 로 나타났으며, TNT의 약량이 작을수록 높고 넓은 범위의 환산두께가 나타났다. 또한 환산거리 변화에

따른 피크 과압 및 환산충격량의 저감 정도는, TNT 0.1 kg의 환산두께 $0.04 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$, 0.05 kg의 환산두께 $0.07 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 등과 같은 낮은 환산두께 범위에서는 적게 나타나며, TNT 0.025 kg의 환산두께 $0.025 \text{ m} \cdot \text{kg}^{-1/3}$ 와 같은 높은 환산두께 범위에서는 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 즉, 환산두께가 커질수록 완충재에 의한 피크 과압 및 환산충격량의 저감 효

과는 동일하게 크게 나타난다.

4. 결 론

본 연구에서는 TNT폭약 근거리에서의 완충재에 의한 직접적인 폭풍압 저감 효과를 파악하기 위하여, 완충재로서 water gel을 사용하고 완충재의 밀도 및 두께를 달리한 폭발실험을 실시하였다. 본 연구에서 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 4 종류의 모든 완충재의 밀도에서 TNT 폭발시에 발생하는 피크 과압이 감소하였으며, 완충재의 밀도가 증가함에 따라 모든 환산거리에서의 피크 과압의 저감 정도가 증가하였다.
- 2) 피크 과압의 저감 정도가 상대적으로 크게 나타나는 환산거리가 존재하며, 폭원 근거리에서는 완충재에 의한 피크 과압의 저감 효과가 크며 환산거리가 증가함에 따라 저감 효과가 적어진다. 또한, 환산거리가 증가하게 되면 완충재의 밀도가 증가함에 따라 피크 과압의 저감 정도가 완만하게 변화하였다.
- 3) 환산거리 및 환산두께는 TNT의 약량이 작을수록 높고 넓은 범위로 나타나며, 약량이 클수록 낮고 좁은 범위로 나타났다.
- 4) 3 종류의 모든 완충재의 두께에서 피크 과압이 감소하였으며, 완충재의 환산두께가 증가함에 따라 모든 환산거리에서의 피크 과압의 저감 정도가 증가하였다.
- 5) 완충재의 밀도 및 두께변화에 따른 환산충격량의 저감 정도는 피크 과압의 저감 정도와 동일한 경향이 나타났다.
- 6) water gel에 의한 폭풍압 저감효과가 확인되었으며, 향후 TNT와 폭발에너지의 방출량 및 방출속도가 다른 폭약에 대한 검토, 다른 종류의 완충재에 대한 검토 등이 필요하다고 판단된다.

References

Arai, H. and Hiyohi, R.I. (2011) Blast pressure measurement of small charged powder TNT in a closed explosion chamber, *Sci.*

- Tech. Energetic Materials*, Vol. 72, No. 5, pp. 141-146.
- Arai, H. and Hiyohi, R.I. (2011) Blast pressure measurement of TNT and commercial explosives above the ground, *Sci. Tech. Energetic Materials*, Vol. 72, No. 1, pp. 1-8.
- Baker, W.E. (1973) Explosion in air, University of Texas, Austin, pp. 150-163.
- Ha, J.H., Yi, N.H., Kim, S.B., Choi, J.K., and Kim, J.H. (2010) Experimental study on blast resistance improvement of RC panels by FRP retrofitting, *J. Korea Concrete Institute*, Vol. 22, No. 1, pp. 93-102.
- Homae, T., Matsumura, T., Wakabayashi, K., and Nakayama, Y. (2008) Blast mitigation by a full-scale concrete wall, *Sci. Tech. Energetic Materials*, Vol. 69, No. 3, pp. 92-97.
- Japan explosives society (1989) New blasting handbook, Sankaido, pp. 352.
- Kingery, C.N. and Pannill, B.F. (1964) Peak overpressure vs scaled distance for TNT surface bursts (Hemispherical charges), BRL Memorandum Report No. 1518.
- Kinney, G.F. (1962) Explosive shock in air, The Macmillan Company, NY, pp. 188.
- Kinney, G.F. and Graham, K.J. (1985) Explosive shock in air, 2nd ed., Springer-Verlag, NY, pp. 7-118.
- Maeda, M. and Shindo, T. (1993) Experiments of reducing of sound level from blasting under sand covering, *Sci. Tech. Energetic Materials*, Vol. 54, No. 1, pp. 14-20.
- Matsunaga, T., Aochi, T., Tanaami, K., Iida, M., Miyamoto, K., Miyake, A., and Ogawa, T. (2000) Blast pressure measurement of small charged powder TNT in a closed explosion chamber, *Sci. Tech. Energetic Materials*, Vol. 61, No. 3, pp. 134-140.
- Park, D.J. and Kim, N.I. (2011) Experimental investigations on the characteristics of explosion mitigations by different concentrations of Agar gel barrier, *J. Korean Institute of Gas*, Vol. 15, No. 5, pp. 13-18.
- Park, D.J. and Kim, N.I. (2012) Explosion characteristics by different sizes in the wall surface shape of a water gel barrier, *J. Korean Institute of Gas*, Vol. 16, No. 3, pp. 65-70.

© Received March 26, 2013

© Revised March 28, 2013

© Accepted April 29, 2013