

혼합 가스폭발이 지하구조물 안정성에 미치는 영향 평가

김민주¹⁾ · 권상기^{1)*}

An Evaluation of the Influence of a Mixed Gas Explosion on the Stability of an Underground Excavation

Minju Kim, Sangki Kwon

Abstract With the increase of the utilization of underground space in Korea, explosion accidents at the underground facilities such as gas pipes have occurred frequently. In urban area with high population density, individual explosion accidents are likely to spread into large complex accidents. It is necessary to investigate the effect of explosion on the stability of underground structures in urban area. In this study, a sensitivity analysis was carried out to investigate the possible influence of nearby explosion on the stability of underground structure with 8 parameters including explosion conditions and rock properties. From the sensitivity analysis using AUTODYN, the main and interaction effects of each parameters could be determined. From the analysis, it was found that the distance between explosion point and tunnel, charge weight, and Young's modulus are the most important parameters on the stress components around a tunnel.

Key words Gas explosion, Mixed gas, TNT equivalent, AUTODYN, Sensitivity analysis

초 록 국내의 지하공간 활용이 증가함에 따라 지하에 매설되어 있는 가스관과 같은 시설물에서의 폭발 사고가 꾸준히 발생하고 있다. 인구밀도가 높은 도심지에서는 개별의 폭발 사고가 복합적인 큰 사고로 확산될 가능성이 존재한다. 따라서, 도심지에서의 폭발이 지하구조물의 안정성에 미치는 영향을 평가하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 터널과 인접한 곳에서의 폭발이 지하구조물의 안정성에 영향력을 미치는 요인들의 영향을 파악하기 위하여 폭발 조건과 암반의 물성을 포함한 8개 인자들에 대한 민감도 분석을 실시하였다. AUTODYN을 이용한 민감도 분석을 통해 각 인자들의 주영향과 교호작용효과를 분석하였다. 분석 결과, 폭발지점과 지하구조물 사이의 거리, 폭약량, 암석의 탄성계수가 터널 주변 응력성분에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

핵심어 가스폭발, 혼합가스, TNT 등가량, AUTODYN, 민감도 분석

1. 서 론

대한민국은 약 70%가 산지로 되어있으며, 특히 수도권에 인구의 약 50%가 거주하고 있다. 높은 인구밀도로 인한 국토 부족 현상으로 최근 국내 수도권을 중심으로 지하공간화가 활발히 이루어지고 있다. 서

울 영동대로 지하공간 복합개발, 을지로 일대 지하도시 조성사업, 도로 지하 복층화 사업 등 대규모의 지하공간 개발 사업들이 추진되고 있다. Fig. 1은 10년간 국내 수도권의 터널 개수와 총 연장의 증가량을 나타낸다. 국내 수도권 터널의 개수는 10년간 총 332개가 증가하였으며, 총 연장은 약 2,365km가 증가하여 급속한 증가 추세를 보이고 있다.

지하구조물 주변에는 전기, 가스관, 수도관 등 여러 종류의 배관들이 매설되어 있다. 지하공간 개발 시, 인접한 가스관 등으로 인한 폭발 위험성이 대두되고 있으며 국내 특성상 가스관뿐만 아닌 석유, 전

1) 인하대학교 에너지자원공학과

* 교신저자 kwonsk@inha.ac.kr

접수일 : 2020년 11월 27일

심사 완료일 : 2020년 12월 4일

게재 승인일 : 2020년 12월 9일

기 등의 에너지 관련 배관 시설이 밀집되어 있기 때문에 개별의 폭발사고가 복합적인 큰 사고로 확산될 수 있는 가능성이 존재한다(산업통상자원부, 2019). 국내 가스 폭발사고는 밀폐된 공간에서 발생하는 경우가 대다수이며, 경기도 이천 물류창고 폭발, 용인 물류창고 유증기 폭발, 강릉 수소탱크 폭발 사고가 발생했다. 국외의 폭발사고 사례로 노르웨이 수소충전소 폭발, 덴진항 폭발사고, 레바논 베이루트 질산암모늄 폭발이 발생했다. 덴진항 폭발사고의 규모를 TNT의 양으로 환산했을 때, TNT 24톤 규모이며 베이루트 폭발사고는 최대 TNT 1100톤 규모이다. 이처럼 급속한 에너지 분출을 가져오는 폭발은 인적, 경제적으로 막대한 피해를 가져오기 때문에 폭발 현상에 대한 이해는 폭발성 구조의 방폭 설계와 폭발성 물질의 안전한 관리를 위해 반드시 필요하다(권과 김, 2016). 이러한 폭발 사고의 예방을 위해서는 폭발 사고의 원인, 현상의 분석이 밀바탕이 되어야 하며, 폭발 현상에 대한 정확한 해석이 매우 중요하다. 폭발 에너지와 파괴 양상을 직접적으로 확인하는 것은 안전상의 한계가 존재하기 때문에 간접적인 방법으로 이론식과 폭발 시뮬레이션 프로그램 등 수치 해석 방법에 의하여 암반의 복잡한 거동을 분석하고 있다(김영민, 2011).

가스 폭발 규모 예측 방법으로는 TNT 등가량 산정 방법(TNT equivalent method), 다중에너지방법(Multi-Energy method), BST방법(Baker-Strehlow-Tang method)방법 등이 있다(한우섭 외, 2015). 다중에너지 방법은 폭연(deflagration)을 기초로 하여 증기운(vapor cloud)폭발의 평가를 위한 계산방법이다. 증기운 폭발은 주로 폭연의 형태로 발생하며, 다중에너지방법은 증기운 중 일부분에서 폭발한다고 가정한다(Van, 1985). BST방법은 다중에너지방법에 기반으로 한 방법으로, 다중에너지방법과 마찬가지로 증기운 중 일부분에서 폭발이 일어난다는 것을 가정하고 있다. BST 방법은 광범위한 범위의 장애물 밀도, 연료 반응성을 기반으로 폭발 속도에 대한 지침을 제공한다(Pierorazio, 2005). TNT 등가량 산정법은 가스 폭발 시 증기운 전체에서 폭풍이 발생한다는 전제하에 폭발로 방출되는 에너지를 TNT의 질량으로 환산한다(한우섭 외, 2015). TNT 등가량 산정법은 가연성 물질이 폭발할 때 발생하는 에너지를 동일한 양의 에너지를 발생시키는 TNT의 질량으로 변환한 값을 의미한다(Crowl, 1969). TNT 등가량 산정법은 거리에 따른 폭발 피해 예측에 주로 사용되고 있으며(권과 박, 2015), 다양한 폭발 현상에 적용할 때 보수적이며 간단한 방법으로 활용될 수 있다(Baker et al., 1983).

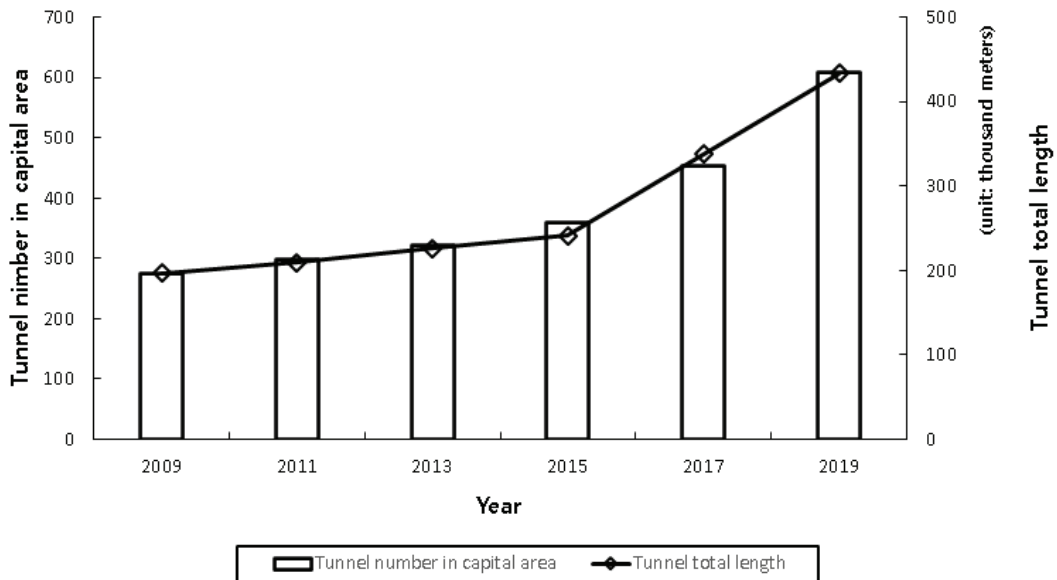


Fig 1. Increase of the number of tunnels and tunnel total length in urban area(KOSIS,2019).

가스 폭발 피해 예측은 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 그 영향을 파악하고 있다. 대표적인 폭발 해석 프로그램은 AUTODYN, LS-DYNA, ABAQUS, CONWEP등이 있으며 이러한 프로그램들은 현장 실험을 수행하는 것보다 안전하고 경제적이다. 국내의 경우, 여건상 폭발 현장 실험의 어려움이 있기 때문에 신뢰성 있는 수치 해석이 필요하며 수치 해석을 위해서는 최대압력(peak overpressure)의 산정과 폭발 압력의 시간에 따른 감쇄 형상에 대한 이해가 필수적이다(권상기, 2017).

국내의 가연성 가스로 인한 폭발 영향, 피해 관련 연구는 주로 지상의 구조물의 파괴 양상을 이론식과 해석 프로그램을 통하여 이루어져 왔다. 권상기(2017)는 폭발파의 특성을 예측하기 위하여 다양한 경형식을 비교, 분석하였다. 환산거리에 따른 폭발파의 특성을 예측하기 위한 여러 인자들의 경형식을 비교하였을 때, 각 폭발 해석 식마다 적용되는 조건이 상이하기 때문에 각 인자들마다 상당한 차이를 보였다. 권과 김(2016)은 중국 텐진항 폭발 사고의 규모를 이용하여 폭발 에너지 분석을 TNT 등가량 개념으로 폭발 현상을 모사하고 그 폭발 충격을 분석하였다. 또한 폭발 가스 에너지를 거리에 따른 폭발 압력과 임펄스의 변화를 추정하고 분석하였다. 전과 한(2016)은 폭발 하중을 산정을 위해 사용되는 CONWEP모델의 단점인 복잡한 모델 구성을 단순화하여 간략식을 제안하였다. 폭발 하중의 압력-시간 이력곡선을 단순화하였을 때, 간략식과 CONWEP모델의 오차율은 1% 미만으로 나타났다. 김과 안(2014)은 철근 콘크리트 지상 구조물의 폭발 하중에 대한 연쇄 붕괴 거동과 폭발 거동에 대한 침식 기준을 제안하였다. 해석 모델은 미국의 차량 폭탄 테러에 의한 건물 연쇄 붕괴 사건을 가정하여 AUTODYN 프로그램을 사용하여 폭발 해석 및 연쇄 붕괴 양상을 조사하였다. 김의수 외(2015)는 원룸 구조와 유사한 철근 콘크리트 구조를 모델링 하여 TNT 등가 방법을 통해 LNG의 양을 계산한 후, AUTODYN 프로그램을 이용하여 가스폭발로 인한 피해 양상을 분석하였다. LNG의 폭발 하한계인 4.9%보다 최대 폭발 압력이 작용하는 LNG 공기 중 농도가 9%의 경우가 폭발 전파속도가 더 빠르게 나타났으며, 폭발력도 크게 나타났다. 국내의 지하 구조물의 압력변화, 파괴양상과 관련된 연구는 주로

터널 내부의 폭발로 인한 폭발영향 분석 연구를 중심으로 진행되고 있다. 심재원 외(2020)는 2차로 마제형 터널 내에 폭발이 일어났을 때 AUTODYN을 이용하여 폭발 수치해석을 진행하였다. 도로터널의 형상은 실제 터널과 동일하게 모델링 하였으며, TNT 폭발량 25kg을 적용하여 마제형 터널 내부의 다양한 위치에서 유조차가 폭발했을 때의 터널 내부의 응력값을 비교, 분석하였다. 장과 정(2016)은 CFD(Computational fluid dynamics) 프로그램인 FLACS를 이용하여 지하 공동구 내에 매설되어 있는 가스 배관에 메탄가스가 폭발을 일으켰을 때의 공동구 내부의 폭발이 상부 지상 시설물에 미치는 영향을 평가하였다. 이처럼 국내 연구는 터널 내부나 지상 구조물을 대상으로 폭발 영향을 분석한 연구는 진행된 바 있지만 지하에 매설된 가스의 폭발로 인한 압박에 미치는 영향에 관련된 국내의 관련 연구는 미진한 상황이다. 공기를 통해 지중에 전파되는 폭발파의 영향, 파괴양상을 이해하는 것도 중요하지만 지하 구조물을 둘러싼 압박으로부터 폭발파의 영향, 파괴 양상은 지하 구조물 파괴의 위험성을 파악할 수 있고 지상의 폭발파의 영향보다 더욱 복잡하고 중요하다(Chowdhury and Wilt, 2015).

국외의 지하 구조물의 파괴양상과 관련된 연구에서는 절리가 존재하는 암석을 이용하여 폭발해석을 주로 진행하고 있으며 PPV(Peak Particle Velocity)와 같은 진동해석 중심으로 폭발 해석이 이루어져 오고 있다. Kuili and Sastry(2018)은 불연속면을 효과적으로 모델링 할 수 있는 3DEC 시뮬레이션을 이용하여 세로 절리 간격이 4m, 가로 절리 간격이 4m이며 RMR이 65점인 암반의 50m 하부에 존재하는 터널을 대상으로 연구를 진행하였다. 터널 20m 내부에서 발파를 하였으며, PPV에 따른 변위를 터널의 상,하,좌,우 경계면에서 2m 간격으로 측정하였다. PPV는 발파가 진행되는 동안 변위에 많은 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한 절리에 따른 PPV의 감쇠 영향은 무결암일 때 보다 절리가 존재했을 때의 PPV의 감쇠가 더 빠르게 일어난 것으로 나타났다. 또한 같은 위치에서 절리가 가로로 존재할 때와 세로로 존재할 때의 PPV를 비교한 결과, 세로 방향의 절리에서 더 큰 PPV가 관찰되었다. Mitelman and Elom(2014)는 ELFEN을 이용한 FEM-DEM의 하이브리드 모델을 개발하였다. 폭발에 의한 발파 압력의 생성은 FEM

코드인 AUTODYN을 이용하여 초기 물성들을 측정하였고, 이 결과들을 ELFEN에 적용하였다. AUTODYN 실험 모델에 의해 측정된 주파수 및 최대 압축응력을 ELFEN 코드에 적용하였다. 적용된 ELFEN 코드로 지표면에 발파 압력을 주었을 때, 직경 10m인 터널에 반사로 인한 인장 파괴 양상을 비교 분석하였으며, 각 암석 종류에 대한 PPV에 필요한 상수들을 결정하였다. 모델링 결과에 따르면 제안된 방법이 발파에 의해 유도된 터널의 손상을 분석하기 위한 신뢰할 수 있는 도구라는 것을 보여주었다. Deng et al.(2015)은 DEM 코드인 UDEC(Universal Distinct Element Code)과 FEM 코드인 AUTODYN을 결합하여 실제 스웨덴의 Älvdalen의 압력실에서 진행했던 폭발 실험과 파괴양상, PPV의 진행을 비교하였다. 지하 압력실에서 10톤의 TNT를 폭발 시키는 큰 규모의 실험을 진행하였으며, UDEC으로 암석의 절리 조건(절리 방향, 간격, 마찰각, 절리 수직 강성, 절리 전단강성)을 고려한 모델링을 진행하였다. AUTODYN으로는 등방, 균질, 탄성의 암석으로 가정하고 폭발 해석을 진행하였다. AUTODYN의 폭발 해석의 결과 중 하나인 유도 충격파를 UDEC에 동일하게 지정, AUTODYN의 속도-시간 이력을 UDEC의 경계조건으로 채택하여 결합 모델을 설정하였다. Liu(2009)은 FEM 코드인 ABAQUS를 이용하여 뉴욕 지하철 테러 상황을 재현하여 지하공간에 터널이 2개가 존재할 때, 다양한 조건에서 터널 내부에 폭발이 발생하는 경우 터널을 지보하고 있는 콘크리트 라이닝의 응력을 분석하였다. TNT의 장약량, 암석의 종류를 변화시키면서 라이닝의 응력의 변화를 분석하였는데, 장약량 보다는 암석의 종류에 따른 최대 응력이 더 영향력을 미치는 것으로 나타났다. 또한 터널 주변을 둘러싸고 있는 지반의 점착력과 영률을 변화시키며 모델링을 진행하였을 때 점착력은 라이닝 응력에 대한 변화가 미미한 반면, 영률은 증가할수록 라이닝 응력이 급격히 감소하는 양상을 보였다. 따라서 연약한 지반에서도 폭발물을 이용한 테러 공격을 받는 지하철 터널 주변 강도보다 강성이 더 중요함을 알 수 있다.

본 연구에서는 AUTODYN을 사용하여 폭발영향분석을 수행하였다. 실제 도심지의 상황을 가정하여 지하공간 상부에 존재하는 가스가 폭발하였을 때 지하

공간 파괴에 영향을 미치는 인자들이 폭발로 발생한 응력 성분에 얼마나 영향을 끼치는지 파악함으로써 향후 지하공간의 안정성 평가를 위한 기초 자료를 제공하고자 하였다. 파괴에 영향을 미치는 인자들을 고려하여 전처리 과정은 ANSYS Explicit을 사용하였고 폭발 영향분석은 폭발 시뮬레이션 프로그램인 AUTODYN을 이용하여 최대 응력 계산과 지하공간 주변의 파괴 양상을 파악하였다. 또한 통계분석 프로그램인 SPSS를 이용하여 민감도 분석을 진행하였고 지하구조물에 영향을 미치는 인자들의 영향을 분석하고자 하였다.

2. 가스폭발

2.1 가스 폭발의 정의

가스폭발이란 혼합 가스의 증기운, 즉 가연성 가스와 공기의 혼합물 또는 가연성 가스와 산화제의 혼합물이 연소 압력의 급격한 증가로 인하여 파괴 작용을 하는 현상이다(Bjerketvedt et al., 1997). 폭발의 필수적인 요소는 가연성가스, 점화원, 산화제이며, 이 세 가지의 조건을 만족해야 가스 폭발이 발생한다. 가스 폭발은 파이프 내부, 건물 등 밀폐된 공간뿐 만 아니라 개방된 장소, 즉 특정할 수 없는 공간에서 충분히 발생할 수 있다. 연소에 의해 발생하는 압력은 화염이 얼마나 빨리 전파되는지, 압력이 증기운으로부터 팽창되는 양상에 따라 달라진다. 가스 폭발의 결과는 손상이 전혀 없는 것부터 물질의 완전한 파괴까지 범위가 다양하다. 가스 폭발로 인한 과압(overpressure)의 증가는 사람, 건물을 손상시키거나 연쇄적으로 큰 화재 사고로 나타날 수 있다. 가스 폭발의 결과는 증기운의 크기와 농도, 발화점의 위치, 발화원의 강도 등에 영향을 받는다. 이러한 요인의 변화로 인하여 가스 폭발의 결과는 매우 민감하게 변화할 수 있다. 그러므로 가스 폭발의 결과를 추정하는 것은 간단한 과정이 아니다. 가스폭발은 가연성 가스의 공기 중 특정 비율에 있을 때 폭발할 수 있으며, Table 1은 대표적인 가연성 가스들의 폭발 범위를 보여준다. 폭발성 가스의 폭발 하한 이하나 상한 이상은 산화반응이 일어나더라도 폭발이 발생하지 않는다. 이는 가연성 가스 분자의 양이 상한보다 많거나 하한보다 적으면 산소와 가연성가스 두 분자간에 화학반응이 일어날 수 있는 유효한 충돌 횟수가 감소하고, 또 충돌한 경

우라도 충돌에 의한 에너지가 주위로 흡수되어 충돌 반응이 연쇄적으로 일어나지 않기 때문이다.

Table 1. Explosion range of combustible gases (298K, 1atm)(Balaraju et al., 2002)

Gases	Explosion range (% in volume)	
	Low	High
Butane(C ₄ H ₁₀)	1.8	8.4
Propane(C ₃ H ₈)	2.1	9.5
Ethane(C ₂ H ₆)	3	12.5
Acetylene(C ₂ H ₂)	2.5	81
Hydrogen(H ₂)	4	75
Ammonia (NH ₃)	15	28
Methane (CH ₄)	5	15
Carbon monoxide (CO)	12.4	74.2
Ethylene (C ₂ H ₄)	2.7	36
Hydrogen sulfide (H ₂ S)	4.3	45
Carbon disulfide (CS ₂)	1	44
Ether (C ₂ H ₅ OC ₂ H ₅)	1.9	48
Acetaldehyde (CH ₃ CHO)	4.1	57
Propylene oxide (CH ₃ CHCH ₂ O)	2.5	38.5
Hydrogen cyanide (HCN)	6	41
Ethylene oxide (C ₂ H ₄ O)	3	80
Benzene (C ₆ H ₆)	1.4	7.1

2.2 혼합가스 폭발 과정

폭발 사고 사례들을 살펴보면, 폭발 사고는 가스가 단독으로 존재할 때 폭발하는 것이 아니라 혼합해 있을 때 폭발 가능 범위가 증가함에 따라 폭발 가능성이 높아지며, 그 위력도 더 강해진다(김과 권, 2020). 그러므로 단독 가스 폭발뿐만 아닌 가스 혼합물들의 폭발 한계와 폭발 매커니즘을 알 필요성이 있다. 가연성 가스혼합물의 폭발 한계는 Le Chaterlier 공식으로 계산할 수 있다.

$$V_m = \frac{100}{P_1/V_1 + P_2/V_2 + \dots + P_n/V_n} \tag{1}$$

이 식에서, V_m은 혼합물의 하한 또는 상한 폭발 한계 퍼센트(%), P_n은 혼합물의 단일 가스 성분의 농도(∑P_n=100%), V_n는 단일 가스 성분의 폭발 부피 상

한, 하한 퍼센트이다. 이 공식은 혼합물의 상한 및 하한이 가스의 비율에 따라 다르다는 것을 의미한다.

3. TNT 등가량

가연성 혼합 가스의 경우, 가스 조성비 및 혼합 특성, 압축 상황에 따라 폭발 압력 및 폭발속도가 크게 달라지며, 비정형화된 형상으로 인해 수치해석 모델링에 바로 적용하기에는 어려움이 있다(김의수 외, 2015). 따라서 본 논문에서는 혼합가스 폭발 특성을 정의하는데 있어서 TNT 등가량 산정 방법을 이용하였다.

3.1 TNT

TNT(trinitrotoluene, C₆H₂(NO₂)₃CH₃)는 용해점이 낮고 열화학적 안정성, 충격, 마찰, 고온에 대한 감도가 낮고, 안전한 제조 방법의 등으로 인해 가장 널리 사용되는 폭발물이다(Taha et al., 1997). TNT는 성분과 폭발력이 일정하고 폭발 특성이 실험에 의해 상세히 측정되었기 때문에 다른 모든 폭발 화합물의 성능을 비교하는 표준 폭발 물질로 활용되고 있다(심재원 외, 2020).

3.2 TNT 등가량의 정의

가스 폭발 시, TNT 등가량 계산을 위해 필요한 인자는 화학 반응식에 관여하는 열적 특성인 물질들의 엔탈피가 필요하다. Sochet(2010)은 폭발에너지를 기반으로 다음과 같은 TNT 등가량에 대한 경험식을 제시하였다.

$$W_{TNT} = \eta_c \frac{W_f H_f}{H_{TNT}} \tag{2}$$

이 식에서, W_{TNT}는 TNT등가량(kg), W_f는 공기중에 있는 폭발물의 총량(kg), H_f는 연료의 단위질량당 엔탈피, (MJ/kg), H_{TNT}는 TNT의 단위 질량당 엔탈피 (4.5MJ/kg), η_c는 TNT의 efficiency factor로써 0.03으로 가정하였다. Lea and Ledin(2002)은 탄화수소를 포함한 가연성가스가 폭발할 때, TNT 등가량을 계산하는 또 다른 식을 제안하였다.

$$W_{TNT} = 10 \times \eta \times W_{HC} \quad (3)$$

이 식에서, W_{TNT} 는 TNT 등가량(kg), W_{HC} 는 공기 중에 있는 탄화수소의 양(kg), η 은 실험에 기반한 yield factor이다(0.03~0.05). 식(3)의 상수 10은 대부분의 탄화수소가 TNT보다 10배 높은 연소열을 가지고 있다는 사실을 나타낸다. 식(2)는 탄화수소를 포함한 모든 폭발물의 질량으로 TNT 등가량을 산정하는 것에 반해, 식(3)은 폭발물을 탄화수소로만 특정 지었다는 점에 차이점이 있다.

3.3 혼합가스 TNT 등가량 환산 방법

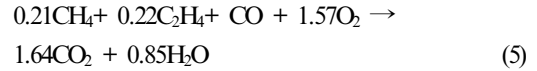
김과 권(2020)은 가연성 가스가 혼합되어 있을 때, 폭발범위 내에서 TNT 등가량을 계산한 바 있다. 예를 들어, 일정 공간 안에 가연성가스인 CH_4 와 CO , C_2H_4 가 혼합되어 있을 때, 화학 반응식은 이와 같다.



CH_4 와 CO , C_2H_4 가 특정한 비율로 혼합되어 있을 때 O_2 의 양이 결정되고, 반응물의 변수인 e , f 가 결정된다. 화학반응식에서, CH_4 와 CO , C_2H_4 의 부피 비율에 따라 TNT 등가량은 변동될 것이다. 각각의 가스 폭발 범위에서 식(1)을 이용하여 혼합 가스 구성에 따른 폭발 상한, 하한을 구할 수 있으며 혼합가스가 폭발 가능 범위에 있는 경우, 구성되는 화학식에서 폭발 에너지를 구할 수 있게 된다. 이후 식(2)를 이용하여 TNT 등가량을 산정할 수 있다. 가연성 가스의 특성은 Table 2와 같다.

예를 들어 공기중에 CH_4 가 5%, C_2H_4 5%, CO 가 25% 존재할 때, 화학방정식으로 구한 혼합가스의 폭

발에너지는 Table 2의 엔탈피 값을 이용하여 다음과 같이 계산할 수 있다.



$$\begin{aligned} H_f &= 0.21 \times (-75) + 0.22 \times (52.26) - 110.5 - 1.64 \times (-393.5) + 0.85 \times (-241.82) \\ &= 736.146J \\ &= 19.71MJ/kg \end{aligned} \quad (6)$$

혼합가스의 부피를 V 라고 가정했을 때, 각 가연성 가스의 질량은,

$$W_{CH_4} = \frac{5}{100} \times 0.668 (kg/m^3) = 0.0334V \quad (7)$$

$$W_{CO} = \frac{25}{100} \times 1.145 (kg/m^3) = 0.2863V \quad (8)$$

$$W_{C_2H_4} = \frac{5}{100} \times 1.26 (kg/m^3) = 0.063V \quad (9)$$

이다.

마지막으로, 식(2)를 이용하여 특정 부피에 따른 TNT 등가량을 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$W_{TNT} = \eta_c \frac{W_f H_f}{H_{TNT}} = 0.03 \frac{(0.034V + 0.2863V + 0.063V)19.72}{4.5} = 0.05V \quad (10)$$

10,000m³에서 혼합 가스 폭발이 발생하는 경우, TNT 등가량으로 환산하면 TNT 500kg 규모의 폭발이 발생하는 것으로 추정할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 조건을 가정하여 폭발영향 시뮬레이션을 실시하였다.

Table 2. Properties of different gases

Name	Standard Enthalpy of Formation	Molecular Weight	Density
Heat of formation	kJ/mol	g/mol	kg/m ³
CH ₄	-75	16	0.668
CO	-110.5	28	1.145
C ₂ H ₄	52.26	28.03	1.26
CO ₂	-393.5	44	
H ₂ O(gas)	-241.82	18	
H ₂ O(liq)	-285.5	18	

4. AUTODYN을 이용한 수치 해석

폭발 시뮬레이션에 사용한 프로그램은 AUTODYN을 적용했다. AUTODYN은 고체, 유체, 기체 역학에서 다양한 비선형 문제를 해결하기 위한 FEM 코드이다(Century Dynamics Ltd, 2003). AUTODYN은 대변형, 대변위와 같은 기하학적 비선형 모델과, 변형률 연화, 강화, 취성파괴 같은 물질 비선형 모델, 시간에 의존하는 대변형 해석 등 여러 문제에 대하여 분석할 수 있다(Ma et al., 1998). 또한 AUTODYN은 다양한 solver를 제공하여 다양한 폭발 시뮬레이션에 사용할 수 있는 기능이 있다. AUTODYN의 solver는 Euler, Lagrange, ALE, SPH 등이 있으며, 본 연구는 고체의 변형에 적합한 Lagrange solver와 유체 이동에 적합한 Euler solver를 사용하였다. Lagrange solver는 초기 요소에서 물질을 고정시키며, 격자(mesh)와 재료와 함께 이동하고 변형되는 형태로 존재한다(Century Dynamics Ltd, 2003). Euler solver는 물질들이 격자와 격자 사이로 흐를 수 있도록 하는 반면, 격자 자체는 공간적으로 고정되어 있다. Euler solver의 장점은 물질의 큰 흐름과 왜곡을 쉽게 처리할 수 있다는 점이다. AUTODYN은 interface 기능을 통해 별도의 수치 격자를 결합할 수 있다. 이러한 기능을 통해 폭발 하중에 따른 구조물의 거동 현상을 실제와 비슷한 조건으로 해석할 수 있다. Interface 기능은 AOUTODYN을 구조물, 유체 및 기체의 여러 시스템과 관련된 문제의 해석을 가능하게 만드는 도구이다.

본 연구는 지하 구조물 상부에 존재하는 폭발 가능성이 있는 가스관과 유류관의 매복 심도, 지하 구조물의 심도, 크기 등을 조사하여 민감도 분석의 수준을 결정할 때 참고하였다. 또한 혼합가스 폭발의 사례들을 참고하여 혼합가스 폭발의 규모를 TNT 등 가량으로 환산하였다. 폭발 시뮬레이션을 위한 전처리 과정은 ANSYS Explicit을 이용하여 암석의 물성 입력, 중력가속도와 같은 초기조건, 격자크기 등을 구성하여 진행하였다.

4.1 모델링 구성

본 연구에 수행된 모델은 Fig. 2와 같다. 암석 부분은 Lagrange 모델, 유체 부분인 TNT와 공기는 Euler 모델을 사용하였다. 모델의 전체 가로 길이는 60m,

세로 길이는 70m이다. 공기층의 두께는 10m로 지정하였다.

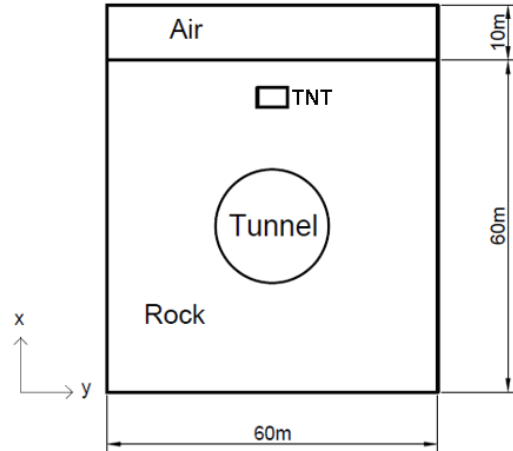


Fig 2. Feature of the model for the sensitivity analysis.

TNT와 공기의 물성은 AUTODYN의 내장되어 있는 물성을 사용하였으며, 모델링에 필요한 암석 물성은 ANSYS Explicit을 이용해 설정하였다. 공기의 상태방정식(EOS, Equation Of State)은 Ideal gas를 사용하였으며, 상태 방정식의 가장 간단한 형태이다. Ideal gas EOS는 다음과 같은 pressure-energy law를 따르고 있다.

$$p = (\gamma - 1)\rho e \quad (11)$$

p는 가스의 압력, $\gamma = 1.4$ 로써 상수이다. $\rho = 0.00125 \text{ g/m}^3$ 로써, 기체의 밀도이다. e는 내부 에너지이며 $2.068 \times 10^5 \text{ kJ/kg}$ 으로 가정된다. TNT의 상태방정식은 The Jones-Wilkens-Lee (JWL)을 사용하였다. JWL EOS는 폭발물에서 화학 에너지에 의해 생성된 압력을 모델링할 수 있으며, 다음과 같은 방정식이 제안되었다(Lee et al., 1968).

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega}{V} E \quad (12)$$

이 식에서 p는 폭발압력, V는 상대부피(ρ_0/ρ , $\rho_0 =$ 폭발물의 폭발 전 밀도, $\rho =$ 폭발 후 현재 밀도), E

는 초기 C-J(Chapman-Jouguet) TNT의 단위 부피 에 너지로써, $6.0\text{E}6 \text{ kJ/m}^3$ 으로 가정한다. A, R_1 , B, R_2 는 상수, ω 는 TNT에 대한 상수이다. Ideal gas EOS와 JWL EOS의 각 인자의 값은 AUTODYN의 Material library에 저장되어 있으며 Table 3, Table 4와 같다.

암반 모델은 AUTODYN 라이브러리에서 제공하고 있는 RHT(Riedel-Thoma-Hiermaier) 콘크리트 모델을 사용하였다(Riedel et al., 1999). RHT 콘크리트 모델은 취성 재료가 동적 하중을 받을 때 거동을 표현하기 위해 만들어졌으며 소성 및 전단에 의한 손상을 동시에 고려할 수 있는 장점이 있다. RHT 콘크리트 모델은 암석이나 세라믹 등과 같은 콘크리트 이외의 다양한 취성 재료를 모델링 하는데도 사용된다. RHT

Table 3. Properties of air used in AUTODYN

Parameter	Value
ρ	0.001225g/cm^3
γ	1.4
e	$2.068 \times 10^5 \text{ kJ/kg}$

Table 4. Properties of TNT used in AUTODYN

Parameter	value
A	$3.7377 \times 10^8 \text{ kPa}$
B	$3.7471 \times 10^6 \text{ kPa}$
R_1	4.15
R_2	0.9
W	0.35
V	1.63g/cm^3
E (C-J Detonation velocity)	$6\text{E}6 \text{ kJ/m}^3$

Table 5. Properties and initial conditions in AUTODYN modeling

Material	EOS	Strength model		Failure model		Erosion model	
Rock	Linear	RHT concrete		RHT concrete		Geometric erosion (%)	
		Shear modulus	10.59 GPa	Tensile failure	Principal stress	Erosion strain	2
		Compressive strength	50MPa	Principal tensile strength	5MPa		
			100MPa		10MPa		
Shear strength	0.18	Crack softening	Yes	Type of geometric strain	instantaneous		
Fracture energy	70 (J/m ²)						
Air	Ideal gas	-	-	-	-	-	-
TNT	JWL	-	-	-	-	-	-

콘크리트 모델은 압력 P, 콘크리트 입자 사이의 각도 θ , 변형률 속도 $\dot{\epsilon}$ 의 함수로 나타낼 수 있다.

$$f(P, \sigma_{eq}, \theta, \dot{\epsilon}) = \sigma_{eq} - Y_{TXC(P)} * F_{\Gamma(P)} * R_{3(\theta)} * (F)_{RATE(\dot{\epsilon})} \quad (13)$$

이 식에서 $Y_{TXC(P)}$ 는 $Y_{TXC(P)} = f_c [A(p^* - p_{spall}^*) F_{RATE(\dot{\epsilon})}]^N$, f_c 는 압축강도, A는 파괴면 상수, N은 파괴면 지수, p^* 은 f_c 에 표준화된 압력, $p_{spall}^* = p^*(f_i/f_c)$, $F_{CAP(P)}$ 은 정수 압력 상태에서 탄성편차 응력을 제한 하는 함수, $R_{3(\theta)}$ 는 모델의 세 번째 불변식, $F_{RATE(\dot{\epsilon})}$ 는 변형률 속도 함수이다. Table 5는 본 연구에 사용된 물성과 초기 조건을 나타내고 있다. 폭발 영향 계산 중, 암석 요소의 erosion strain이 2% 이상이면, 요소를 탈락시키게 설정하였다. Crack softening은 인장 응력을 전달하는 요소의 균열을 효과적으로 표현하기 위한 설정이다. Fracture energy는 균열 발생에 대한

Table 6. Factors and levels for sensitivity analysis

Factor	Level	
	Lower	Higher
TNT burial depth	1.5m	3m
TNT charge weight	500kg	1ton
Tunnel to distance	10m	20m
Tunnel size	5m	10m
Young's modulus	25GPa	50GPa
Poisson's ratio	0.18	0.36
Tensile pressure failure	5MPa	10MPa
UCS(Uniaxial Compressive Strength)	50MPa	100MPa

인장 응력의 총 양을 의미하며, Ai and Ahrens(2005)에서 사용한 값을 인용하였다. 또한 민감도 분석을 위하여, 인장강도와 압축강도의 크기를 변화시키며 폭발 영향 분석을 진행하였다. Table 6은 민감도 분석을 위한 인자와 수준을 나타내며, TNT burial depth는 지표면에서 TNT가 매설 되어있는 깊이를 의미하며, tunnel to distance는 터널의 상부와 TNT 매설부 사이의 거리를 나타낸다.

4.2 경계조건

암반에서의 경계조건은 transmit을 사용하였다. Transmit 경계조건은 고체 영역에서 외부의 폭발파가 전파하는 에너지를 해석영역 경계에 반사하지 않고 그대로 경계 밖으로 통과할 수 있도록 한다(Ma et al., 1998). Air의 경계 조건은 flow out을 사용하였다. Flow out 경계조건은 유체로 전파되는 압력파가 영역으로 되돌아가는 압력을 반사하지 않고 영역 밖으로 나갈 수 있게 한다(Century Dynamics Ltd, 2003). Fig. 3은 transmit과 flow out 경계조건과 측정 지점을 표시한 것을 나타낸다.

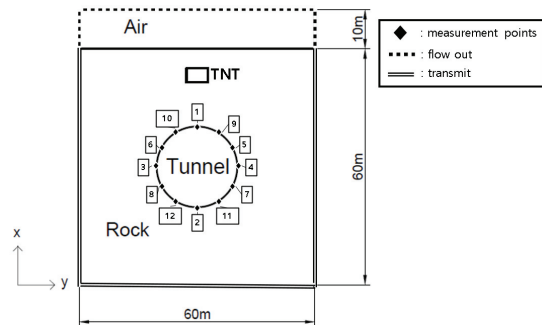


Fig 3. Boundary condition of the model and locations for observation around the tunnel.

4.3 모델링 결과

AUTODYN을 이용한 수치 해석은 폭발파가 충분히 감쇠되는 시간인 100ms 동안 진행하였으며 압축 응력, 인장응력이 최대가 되는 응력성분들과(σ_x , σ_y , σ_1) 최대 지점을 측정하였다. Fig. 4-6은 식 (10)에서 산출된 TNT 등가량 500kg으로 폭발 해석 모델링을 진행하였을 때, 시간에 따른 σ_x , σ_y , σ_1 의 결과를 보여준다. +는 인장응력, -는 압축응력을 나타내며

각 그래프는 지하 공간의 영향으로 인하여 복잡한 양상을 보이고 있다. 폭발파가 각 측정 지점의 폭발파는 최대 응력을 기록한 뒤 급격히 감쇠하는 양상을 보이고 있다. Fig. 6의 측정 지점 1에서의 응력 변화는 폭발파가 도달하고 난 뒤, 암반이 파괴됨으로 인

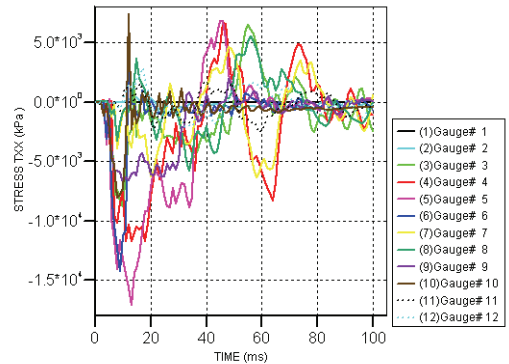


Fig 4. Variation σ_x at the gauges with time.

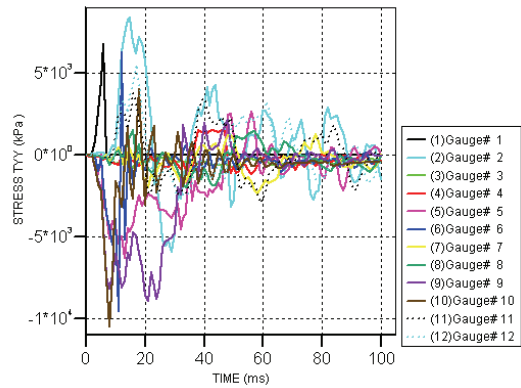


Fig 5. Variation σ_y at the gauges with time.

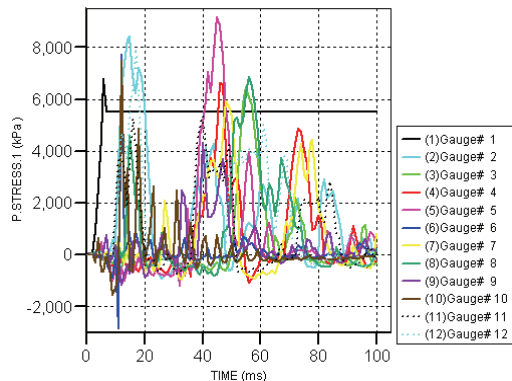


Fig 6. Variation σ_1 at the gauges with time.

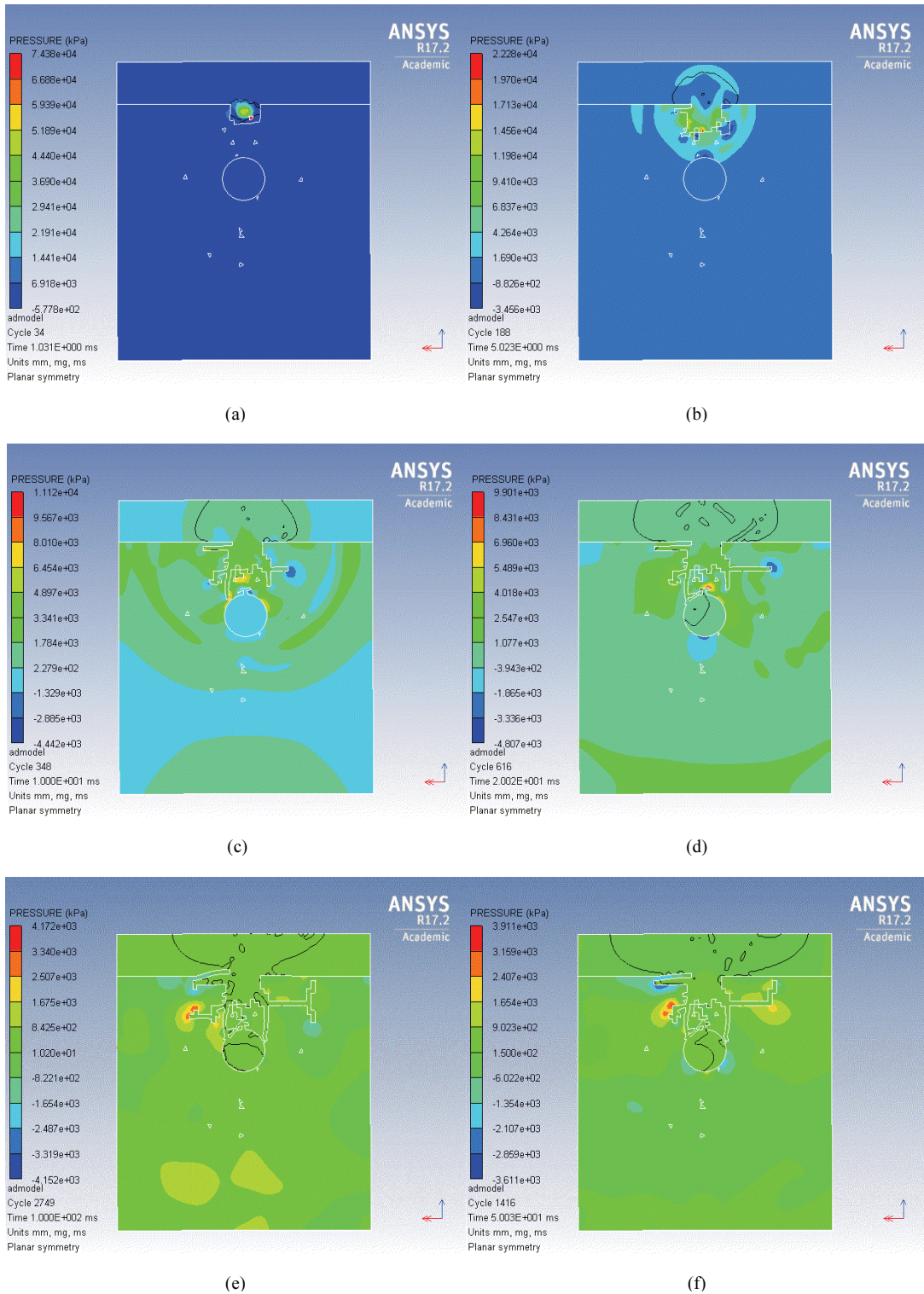


Fig 7. Blast wave propagation in model (a) 1ms, (b) 5ms, (c) 10ms (d) 20ms (e) 50ms (f) 100ms.

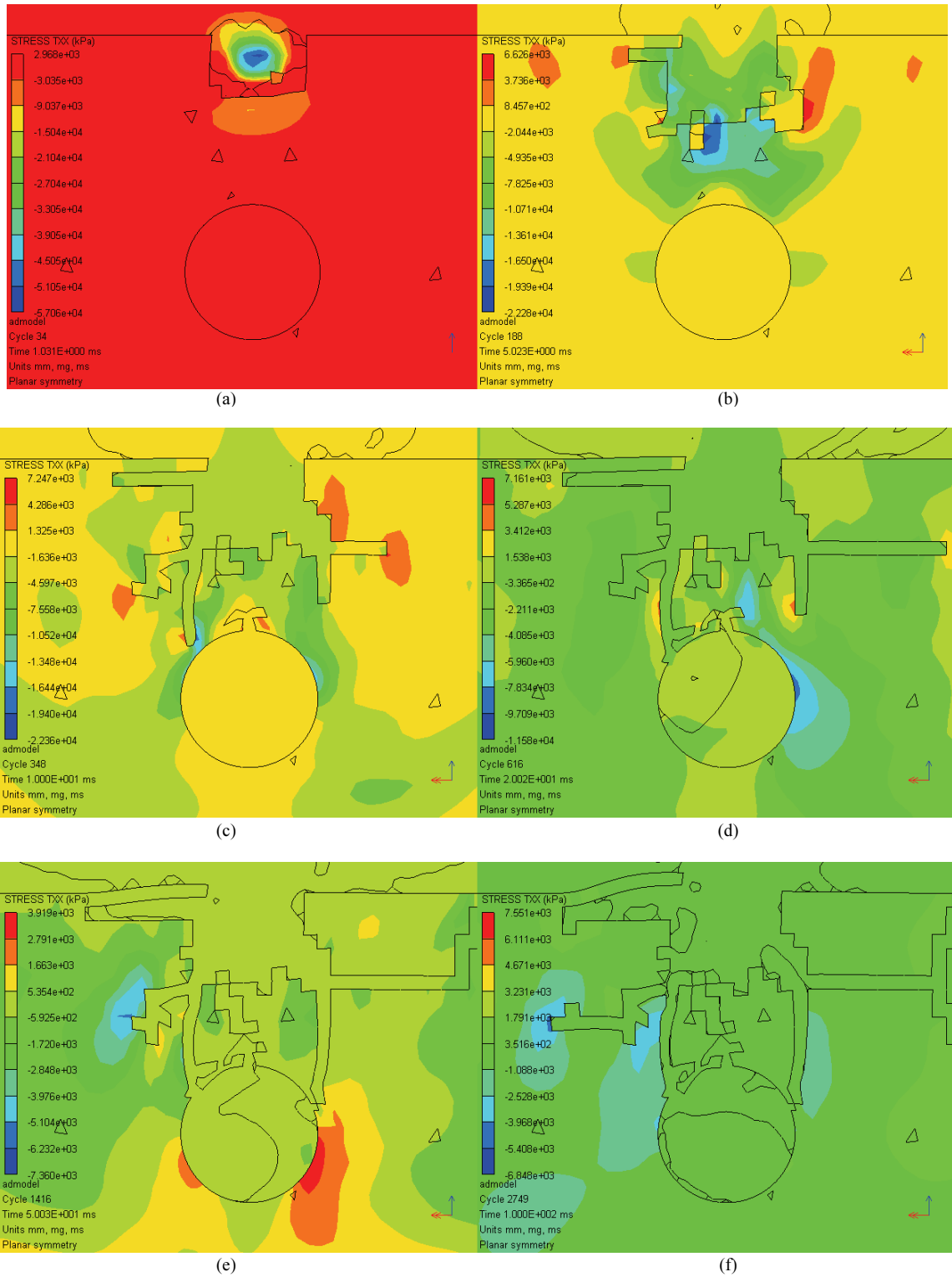


Fig 8. σ_x propagation in model (a) 1ms, (b) 5ms, (c) 10ms (d) 20ms (e) 50ms (f) 100ms.

해 발생한 것으로 사료된다.

Fig. 7은 100ms까지의 폭발과 전파양상을 보여준다. 폭발과는 5ms에 터널로 도달하며, 20ms에는 터널로 인한 반사파와 복잡한 양상을 볼 수 있다.

Fig. 8은 100ms까지 α_x 의 전파 양상과 파괴 양상을 보여준다. 지하에 매설된 TNT가 폭발하면서 암반은 급격한 붕괴가 발생하고 있으며, 암반이 파괴함에 따라 복잡한 응력 양상을 보이고 있다. 또한 50ms에서 터널의 반사로 인한 인장응력이 발생하고 있으며, 100ms에서는 폭발과 전파 이후의 잔류응력이 발생하고 있는 양상을 보이고 있다.

5. 지하 구조물의 폭발 영향 민감도 분석

터널 상부에서 발생하는 폭발에 의해 지하 구조물 주변에서 발생하는 응력성분의($\alpha_x, \alpha_y, \sigma_1$) 최대, 최소값 변화에 미치는 영향을 분석하기 위하여 통계분석 프로그램인 SPSS을 이용하여 민감도 분석을 진행하였다.

5.1 부분요인배치법(fractional factorial design)

요인배치법(factorial design)은 주효과와 교호작용을 모두 평가할 수 있는 장점이 있다. 하지만 완전 요인배치법(full factorial design)은 인자와 종속변수의 관계가 직선일 때 매우 효율적인 실험계획이라 할 수 있지만, 인자가 하나 추가될 때 마다 실험의 양이 2 배씩 증가하는 단점이 있다. 인자가 많아질수록 실험

하기 어려운 상황이 발생하기 때문에 부분요인배치법은 수많은 인자 중에서 중요한 인자를 선별하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 8개의 인자 중 압축강도와 인장강도가 폭발압력 증감에 많은 영향이 없다고 선행 모델링에서 확인하였기 때문에 두 인자의 전체 조합 중 일부분을 선택하여 2⁽⁸⁻²⁾부분요인 배치법을 채택, 총 64번의 민감도 분석을 진행하였다.

5.2 민감도 분석 결과

민감도 분석은 유의수준 5%에서 진행하였으며, 각 인자 별 주효과의 크기는 Table 7과 같다. 주효과란 독립된 인자 각각에서 결과에 영향을 미치는 독립된 효과라 하며, Table 7의 부분에타제곱(Partial Eta Squared)은 독립변수가 종속변수에 주는 영향력을 밝힐 때 이용한다. Cohen(1988)에 따르면 부분에타제곱이 0.14보다 큰 경우 독립변수가 종속변수에 주는 영향력이 충분히 큰 값이라고 볼 수 있다. 각 응력성분에 공통적으로 영향을 미치는 인자는 폭발량과 터널과 폭발물 매설 깊이 사이의 거리로써 이는 폭발파의 폭발, 전달과 직접적으로 관련이 있는 인자이기 때문에 큰 영향력을 보인 것으로 사료된다. 각 응력성분의 인장응력은 공통적으로 터널의 크기가 많은 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이는 폭발파가 터널에 도달하면 파의 반사로 인한 인장응력이 발생하는데, 터널 반지름이 증가할수록 폭발파의 반사 영역이 증가하기 때문에 많은 영향을 미치는 것으로 판단된다. 또한 암석 물성 중 영률도 응력성분에 많은 영향을

Table 7. Main effect of the parameters from sensitivity analysis

Factors	Main effect (Partial Eta Squared)					
	Stress x		Stress y		Stress 1	
	Compressive stress	Tensile stress	Compressive stress	Tensile stress	Compressive stress	Tensile stress
TNT burial depth	0.118	0.02	0.002	0.044	0.13	0.016
TNT charge weight	0.518	0.103	0.25	0.135	0.088	0.1
Distance to tunnel	0.236	0.351	0.291	0.171	0.195	0.315
Tunnel size	0.15	0.059	0.039	0.196	0	0.12
Young's modulus	0.234	0.001	0.042	0	0.065	0.011
Poisson's ratio	0.037	0.039	0.013	0.122	0.064	0.027
Tensile pressure failure	0.016	0.027	0.021	0.125	0.022	0.019
UCS	0.007	0.017	0	0.001	0.001	0.001

미쳤다. 이는 영률이 클수록 응력파를 더 잘 전달하는 성질이 있기 때문에 영향을 미치는 것으로 사료된다. Table 8은 민감도 분석의 교호작용효과를 나타낸다. 교호작용이란 각각의 독립된 인자가 2개 이상 서로 영향을 미칠 때 나타나는 효과를 의미한다. 교호작용효과의 크기는 주효과의 비해 영향력이 미미한 수준임을 알 수 있다.

6. 결과 및 토의

지하공간의 증가와 개발에 따라 지하공간 상부에 존재하는 가스관의 폭발 가능성을 대비하여 폭발로 인한 지하구조물 주변 암반의 가스 폭발에 대한 안정성 영향을 평가하기 위하여 연구를 실시하였다. 민감도 분석을 진행하기에 앞서, 혼합가스 폭발 사례와 폭발 규모를 분석하여 TNT 등가량으로 변환하였으며, TNT 등가량을 AUTODYN에 적용, 폭발영향 분석을 진행하였다. 부분요인배치법을 이용하여 인자 8개, 2수준으로 AUTODYN을 이용한 민감도 분석을 총 64번 진행하였으며, 100ms까지 측정된 각 응력성분의 최대값을 기록하여 지하구조물 주변 암반의 안정성을 분석하였다. 민감도 분석 결과, 터널 상부에서의 폭발로 인한 터널 주변 각 응력성분(α_x , α_y , σ_1) 변화에 영향을 미치는 인자는 폭발지점과 지하 구조물 사이의 거리, 폭발량이며 폭발지점과 지하 구조물 사

이의 거리의 주효과 평균은 0.26, 폭발량의 주효과 평균은 0.2이다. 이는 폭발파 도달, 폭발파의 반사로 인한 터널 주변 응력에 직접적으로 영향을 미치는 인자이기 때문으로 사료된다. 암석물성 중, 영률(Young's modulus)은 α_x , α_y 의 압축응력에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 본 논문은 균질한 암반을 가정하여 2D 모델링을 진행하였기 때문에 실제 암반의 조건과 같은 절리가 존재하는 암반, 풍화층 등 여러 층이 존재하는 암반에서의 폭발현상에 대한 3D 모델링도 필요할 것으로 사료된다. 본 논문을 통해 얻어진 연구 내용은 향후 도심지에서의 가스 폭발을 대비한 효율적인 방화, 방폭 설비의 설계 및 운용에도 도움이 될 것이다.

감사의 글

이 논문은 한국연구재단의 이공분야기초연구사업(NRF-2019R1D1A1060884)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 권상기, 2017, 폭발파에 의한 폭발압력곡선 경험식에 관한 연구, 화약·발파, Vol. 35, No. 1, pp. 1-17.
2. 권상기, 김하영, 2016, 중국 텐진항 폭발사고 원인과 관련된 폭발 에너지 분석, 화약·발파, Vol. 34, No. 1, pp. 1-10.
3. 권상기, 박정찬, 2015, 가스폭발에 따른 폭발에너지를

Table 8. Interaction effect between parameters from the sensitivity analysis

Interacting factors	Interaction effect (Partial Eta Squared)					
	Stress x		Stress y		Stress 1	
	Compressive stress	Tensile stress	Compressive stress	Tensile stress	Compressive stress	Tensile stress
TNT burial depth · TNT charge weight	0.008	0.007	0.038	0.008	0.022	0.003
TNT Burial depth · Tunnel to distance	0.027	0.01	0.007	0	0.051	0.077
TNT Burial depth · Tunnel size	0	0.08	0.001	0.047	0.062	0.014
TNT Burial depth · E	0.002	0.001	0	0.014	0	0.008
TNT Burial depth · ν	0.085	0	0.001	0.003	0.028	0.018
TNT Burial depth · Tensile strength	0.035	0.034	0.011	0.007	0.043	0.044
TNT Burial depth · UCS	0	0.03	0.058	0.005	0.001	0.047

- 평가하기 위한 TNT 등가량 환산방법에 대한 고찰, 화약·발파, Vol. 33, No. 3, pp. 1-13.
4. 김민주, 권상기, 2020, CO 와CH₄, C₂H₄의 혼합 가스 폭발에 대한 TNT 등가량 계산, 화약·발파, Vol. 38, No. 1, pp. 1-13.
 5. 김영민, 2011, 가스폭발하중에 의한 터널 구조물의 동적거동해석, 한국터널지하공간학회논문집 Vol. 15, No. 5, pp. 413-430.
 6. 김의수, 김종혁, 심종현, 김진표, 고재모, 박남규, 2015, AUTODYN을 이용한 LNG 폭발 사고 위력 평가에 관한 법공학적 연구, 한국안전학회지(구 산업안전학회지) Vol. 30, No. 4, pp. 56-63.
 7. 김한수, 안효승, 2014, 철근콘크리트 건물의 폭발하중에 의한 연쇄붕괴 해석을 위한 침식 기준, 한국콘크리트학회 논문집, Vol. 26, No. 3, pp. 335-342.
 8. 산업통상자원부, 제1차 가스안전관리 기본계획(안) (2015~2019), 2020.08.26.
 9. 심재원, 김낙영, 이현승, 2020, 2차로 마제형 터널 내 폭발 시 동적 거동 시뮬레이션, 한국지반환경공학회 논문집, Vol. 21, No. 5, pp. 23-33.
 10. 장유리, 정승호, 2016, 지하 매설 공동구 내부 가스 폭발에 대한 위험성 평가, 한국가스학회지, Vol. 50, No. 5, pp. 89-95.
 11. 전두진, 한상을, 2016, 폭발해석을 위한 간략 폭발하중 제안식, 한국전산구조공학회 논문집, Vol. 29, No. 1, pp. 67-75.
 12. 한우섭, 한인수, 최이락, 박상용, 2015, 화학물질의 폭발사고 피해예측 및 적용방안 연구, 안전보건공단 연구보고서, pp. 31-37.
 13. Ai, H. A., and Ahrens, T. J., 2006, Numerical Modeling of Shock-Induced Damage for Granite under Dynamic Loading, In AIP Conference Proceedings, Vol. 845, No. 1, pp. 1431-1434.
 14. Autodyn, 2003, Theory Manual. Horsham, UK: Century Dynamics Ltd.
 15. Baker, W.E., Cox, P.A., Westine, P.S., Kulesz, J.J., and Strehlow, R.A., 1983, Explosion Hazards and Evaluation, Elsevier.
 16. Balaraju, B., Mudaliar, K. R., Viswanathan, A., and Harrison, B. K., 2002, The ASTM Computer Program for Chemical Thermodynamic and Energy Release Evaluation CHETAH 7.3 User Guide, West Conshohocken, Pennsylvania: ASTM International.
 17. Bjerketvedt, D., Bakke, J. R., and Van Wingerden, K., 1997, Gas Explosion Handbook., Journal of Hazardous Materials, Vol. 52, No. 1, pp. 1-150.
 18. Chowdhury, A. H., and T. E. Wilt., 2015, Characterizing Explosive Effects on Underground Structures. US Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Security and Incident Response.
 19. Cohen, J., 1988, Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences. Academic Press.
 20. Crowl, W.K., 1969, Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, Technical Manual TM 5-1300, US Army, Navy and Air Force, US Government.
 21. Deng, X.F., Chen, S.G., Zhu, J.B., Zhou, Y.X., Zhao, Z.Y., and Zhao, J., 2014, UDEC-AUTODYN Hybrid Modeling of a Large-Scale Underground Explosion Test, Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 48, No. 2, pp. 737-747.
 22. KOSIS(국토교통부. 전국터널현황), 2020.10.13.
 23. Kuili S and Sastry, V.R., 2018, A Numerical Modelling Approach to Assess the Behaviour of Underground Cavern Subjected to Blast Loads, International Journal of Mining Science and Technology, Vol. 28, No. 6, pp. 975-983.
 24. Lea, C. J., and Ledin, H.S., 2002, A Review of the State-of-the-Art in Gas Explosion Modeling, Health and Safety Lab. report, HSL/2002/02.
 25. Lee, E. L., Hornig, H. C., and Kury, J. W., 1968, Adiabatic Expansion of High Explosive Detonation Products (No. UCRL-50422), Univ. of California Radiation Lab. at Livermore, Livermore, CA (United States).
 26. Liu, H., 2009, Dynamic Analysis of Subway Structures Under Blast Loading. Geotechnical and Geological Engineering, Vol. 27, No. 6 pp. 699-711.
 27. Ma, G.W., Hao, H., and Zhou, Y.X., 1998, Modeling of Wave Propagation Induced by Underground Explosion, Computers and Geotechnics, Vol. 22 No. 3-4, pp. 283-303.
 28. Mitelman, A and Elmo, D., 2014, Modelling of Blast-Induced Damage in Tunnels Using a Hybrid Finite-Discrete Numerical Approach, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol. 6, No. 6, pp. 565-573.
 29. Pierorazio, A. J., Thomas, J. K., Baker, Q. A., Ketchum, D. E., 2005, An Update to the Baker-Strehlow-Tang Vapor Cloud Explosion Prediction Methodology Flame Speed Table, Process Safety Progress, Vol. 24, No. 1, pp. 59-65.
 30. Riedel, W., Thoma, K., Hiermaier, S., and Schmolinske, E., 1999, Penetration of Reinforced Concrete by BETA-B-500 Numerical Analysis Using a New Macroscopic Concrete Model for Hydrocodes, In Proceedings of the 9th International Symposium on the Effects of Munitions with Structures, Vol. 315, Berlin-Strausberg Germany.
 31. Sochet, I., 2010, Blast Effects of External Explosions.
 32. Taha, M., Soewarto, I., Acar, Y., Gale, R., and Zappi, M., 1997, Surfactant Enhanced Desorption of TNT from Soil, Water, Air, and Soil Pollution, Vol. 100, No. 1, pp. 33-48.
 33. Van den Berg, A. C., 1985, The Multi-Energy

Method: A Framework for Vapour Cloud Explosion
Blast Prediction, Journal of Hazardous Materials,

Vol. 12, No. 1, pp. 1-10.



김민주

인하대학교 에너지자원공학과 석사과정

Tel : 032-860-7554

E-mail : Minujjang11@gmail.com



권상기

인하대학교 에너지자원공학과 교수

Tel : 032-860-7554

E-mail : kwonsk@inha.ac.kr