

## 연속적 폭굉속도 측정 시스템을 이용한 테르밋 반응 혼합물의 연소전파속도 측정에 관한 연구

김민성<sup>1)</sup>, 강형민<sup>2)</sup>, 정상선<sup>3)</sup>, 정윤영<sup>4)</sup>, 박 훈<sup>5)</sup>, 조상호<sup>6)\*</sup>

### Determination of Combustion Propagation Velocity of Thermite Reaction Mixture Using Continuous VOD Measurement System

Min-Seong Kim, Hyeong-Min Kang, Sang-Sun Jeong, Yun-Yeong Jeong,  
Hoon-Park, Sang-Ho Cho

**Abstract** The objective of this study is to develop a method for monitoring continuously the combustion propagation behavior of commercial thermite reaction mixtures using conventional continuous VOD (velocity of detonation) system. In order to monitor the combustion front propagation with elapsed time during thermite reaction, the VOD system employs two types of commercial VOD probes and one self-made probe: VOD PROBEROD-OS, VOD PROBEROD-HS and VOD PROBEROD-ES, respectively. Among the probes, the only self made VOD PROBEROD-ES successfully demonstrates the velocity of combustion propagation (VOC) with elapsed time. It was found that VOC of the thermite reaction mixture inside a steel tube has been reached around 200m/s within 100mm distance from the ignition and dramatically increased up to about twice the speed of sound in the range between 100mm and 300mm distance. Finally the VOC reached up to around 800m/s. This results imply that it is necessary to use over 300mm long cartridge of thermite reaction mixture in order to achieve normal VOC of the mixture.

**Key words** Thermite reaction mixture, Continuous velocity of detonation (VOD), Velocity of combustion propagation (VOC), Self-made VOD probe

**초 록** 본 연구의 목적은 연속적 폭굉속도(VOD) 측정시스템을 이용하여 상용 테르밋 반응 혼합제의 연속적인 연소전파거동을 측정하기 위한 방법을 제안하기 위함이다. 두 종류의 상용 VOD 센서(VOD PROBEROD-OS, VOD PROBEROD-HS)와 자체개발한 VOD 센서(VOD PROBEROD-ES)를 기존 연속적 VOD 측정시스템에 적용하여 테르밋 반응과정에서 발생하는 연소전파속도(VOC)를 측정한 결과, 자체 개발한 VOD PROBEROD-ES 센서만 정상적인 연속적 연소전파거동을 보여주었다. 결과적으로, 철재튜브 내 장전된 테르밋 반응 혼합제는 기폭점으로부터 100mm 이내에서 약 200m/s의 연소전파속도를 보였으며, 100mm와 300mm 구간에서 급작스럽게 증가하여 음속의 2배에 가까운 VOC를 나타내었다. 그 이후 서서히 증가하여 최종적으로 800m/s까지 증가하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 테르밋 반응 혼합제를 이용하여 정상적인 VOC나 위력을 기대하기 위해서는 철재 튜브 등으로 완전히 구속된 상태에 길이 300mm 이상 장전하여야 함을 의미한다.

**핵심어** 테르밋 반응 혼합제, 연속적 폭굉속도, 연소전파속도, 자체제작 VOD 프로브

<sup>1)</sup> 전북대학교 자원·에너지공학과 석사과정  
<sup>2)</sup> 전북대학교 자원·에너지공학과 석사졸업  
<sup>3)</sup> 구마모토 대학교 사회환경공학과 박사후기과정  
<sup>4)</sup> (주)SOC 엔지니어링 기술연구소 소장  
<sup>5)</sup> (주)코리아카코 책임연구원  
<sup>6)</sup> 전북대학교 자원·에너지공학과 부교수  
\* 교신저자 : chosh@jbnu.ac.kr  
접수일 : 2015년 9월 5일  
심사 완료일 : 2015년 9월 11일  
게재 승인일 : 2015년 9월 18일

## 1. 서론

고층빌딩 및 주택건물이 밀집해 있는 도심지 내 노후 대형건축구조물에 대한 해체사례가 증가하고 있으며, 대부분 유압 해머, 대형 브레이커 등에 의한 기계적인 해체방법을 채택하고 있어 진동, 소음, 분진에 의한 환경적 문제가 발생하고, 이에 따른 공기 지연 및 공사비 증대 사례가 발생하고 있다(박훈 외 2013). 또한 폭약을 이용한 발파해체공법의 경우 공사기간 및 비용을 현저하게 줄일 수 있는 장점이 있으나 지반진동, 소음, 비산, 분진 등의 환경적인 유해요인이 발생하여 도심지에서 적용하는데 많은 제약을 받고 있는 실정이다. 파쇄작업에서 발생하는 지반진동 및 소음을 저감시키기 위하여 폭약에 비하여 충격력이 적은 플라즈마 파암기, 미진동 폭약, 테르밋 반응 혼합제 등의 새로운 파암기술이 개발되고 있다(민형동 외, 2006, 이종운 외, 2010). 특히 테르밋 반응 혼합제를 이용한 파암 기법은 일반 산업용 폭약의 사용법과 유사하여 기존 발파기술자의 경우 별도의 교육 없이 사용할 수 있는 장점이 있다. 최근에는 테르밋 반응기술을 응용한 증기압 팽창제를 다이아몬드형 장약홀더에 삽입하여 대형 콘크리트 말뚝두부를 간단하게 제거할 수 있는 파쇄기술이 개발된 사례가 있으며, 증기압 팽창제를 팽창형 광관 록볼트에 삽입하여 동시에 다수의 록볼트를 암반 내에 정착시킬 수 있는 기술이 개발되었다(안중량 외, 2012, Jeong et al., 2015). 그러나 테르밋 혼합제의 연소반응은 산업용 화약류와는 달리 불안정한 화학반응을 보이며, 특히 장약밀도, 전색, 습윤 상태 등에 민감하게 반응하여 일정한 위력을 예측하기 어려운 실정이다. 테르밋 반응제 또는 플라즈마 파암제의 응용분야 확대와 재현성 있는 위력을 발휘하기 위해서는 비폭성 반응재의 연소전파속도 및

발생압력에 대한 정밀한 측정이 요구된다.

본 연구에서는 국내에서 시판되는 테르밋 반응제 제품의 연속적 연소반응 여부 및 연소전파특성을 파악하기 위하여, 두 종류의 상용 폭굉속도(Velocity of detonation, VOD) 측정 센서(VOD PROBEROD-OS, VOD PROBEROD-HS)와 자체개발한 VOD 센서(VOD PROBEROD-ES)를 기존 연속적 VOD 측정시스템에 적용하여 테르밋 반응과정에서 발생하는 연소전파속도(Velocity of combustion propagation, VOC)를 측정하였다.

## 2. 폭속 측정법

암석 및 콘크리트의 파쇄에 사용되는 화약류 및 비폭성 반응제의 성능은 장약밀도, 폭굉속도, 반응열, 발생압력, 충격 민감도, 내수성, 내열성 등으로 평가되며, 폭굉속도는 생성가스의 반응 특성 및 위력을 평가하는 지표로 사용된다. 폭약의 폭굉속도 측정은 크게 Point-to-point VOD 측정법과 Continuous VOD 측정법으로 나뉘게 되며, Point-to-point VOD 측정법은 두 측정점 사이의 평균적인 폭발속도를 구하는 도트리쉬 폭속 측정법과 광파이버 센서를 이용한 측정법이 널리 사용되며, Continuous VOD 측정법은 경과시간에 따른 폭굉 파면의 이동거리를 연속적으로 모니터링하는 방법으로 민감한 저항선의 이온반응에 의한 전기적 변화특성을 이용한 방법이다. 이러한 방법에는 Canada MREL사에서 생산하는 Resistance wire VOD method가 대표적이다. 폭굉파의 전파과정을 초고속카메라로 직접 촬영하는 방식도 Continuous VOD 측정법에 해당된다(Suceska, 1997). Table 1에 상용 VOD 측정법의 특징을 정리하였다. Fig. 1은 본 연구에서 적용한 Canada MREL사의 Handitrap recorder

**Table 1.** Commercial system for determining continuous the VOD

	VOD Mate	Handitrap/ Datatrap	Speed-VOD	Shot-Track
Sensor type	Sensor cable	Proberod or wire cable	Cable sensor	Cable sensor
VOD measuring technique	Electrical	Electrical	TDR(reflected electric pulse)	TDR
Resolution	<10mm	<10mm	62mm	62mm
Set-up/uptime requirement	5 - 15min.	10 - 20min.	10 - 20min.	10 - 20min.
Multihole capability	Yes	Yes	Yes	Yes

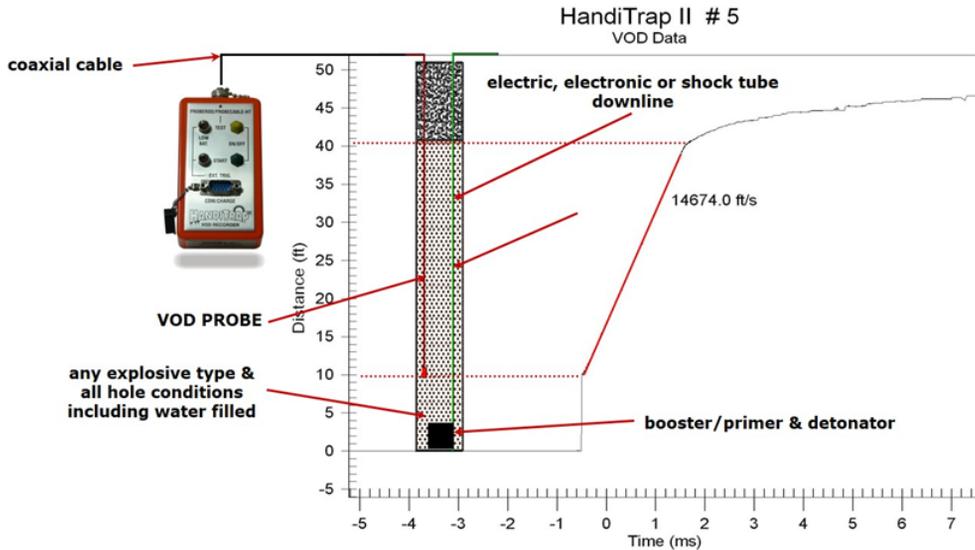


Fig. 1. Typical VOD recording result of an explosive using Handitrap II recorder(MREL Co.).

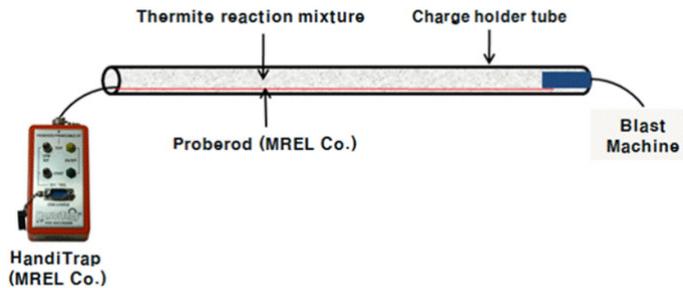


Fig. 2. Schematic description for recording the VOC and a test sample.

를 이용하여 현장벤치발파에 적용된 VOD 측정결과를 보여주고 있다.

### 3. 연소전파속도(VOC) 측정법 개요

#### 3.1 테르밋 반응 혼합제

본 연구에 사용한 테르밋 반응 혼합물은 산업용으로 개발되어 시판되며 비화약류 조성으로 일반 화약류보다 폭발반응속도가 현저하게 낮은 것으로 알려져 있으며 주로 지반진동제어발파에 적용되어오고 있다. 특히 산업용 테르밋 반응 제품은 일반적인 폭약류와 유사하게 전기방전에 의하여 반응제와 접해있는 점화기를 기폭시켜 반응제가 연쇄적으로 연소되도록 유도하는 방식이다. 비화약의 조성물이지만 테르밋 반응

이 시작하면 고온반응열이 발생하면서 금속 고체가 증기로 치환되며 체적팽창하며 주변에 압력을 가하게 된다. 연소전파속도 측정에 사용된 테르밋 반응 혼합물의 겉보기 비중은 1.3g/cc, 반응 온도는 2000°K 이상, 가스발생량은 300ℓ/kg이상으로 알려져 있다.

#### 3.2 테르밋 반응 혼합제의 연소전파속도 측정법

Fig. 2는 테르밋 반응 혼합제품의 연소전파속도를 측정하기 위한 실험방법을 묘사하고 있다. 밀폐상태 및 구속조건에 따른 연소반응을 파악하기 위하여 혼합물을 플라스틱(PC) 및 철관(SP) 장약홀더에 장전하였다. 장약홀더 내에는 VOD PROBEROD와 점화기가 설치되며 장약홀더의 양쪽 끝 공구는 급결 시멘트제인 아랄타이트를 이용하여 밀폐시켰다.

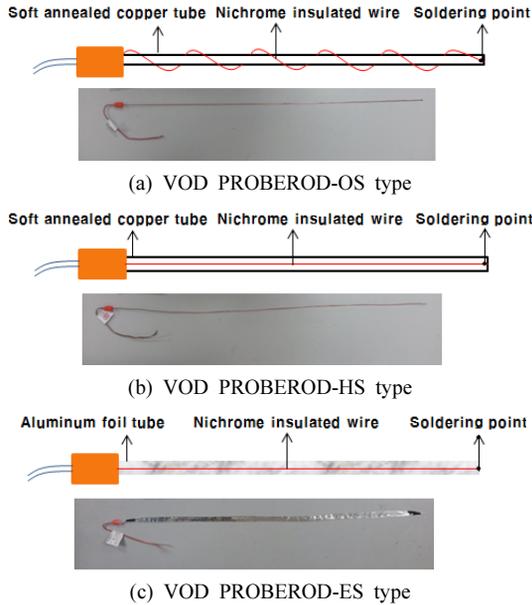


Fig. 3. Schematic diagrams and pictures of the VOD probes for measuring the VOC during thermit reaction.

Fig. 3은 Fig. 2의 VOD PROBEROD로 사용된 센서로서 Fig. 3(a)는 VOD PROBEROD-OS라는 시판 제품으로 판매되는 니크롬 절연 저항선을 구리관에 감아서 끝 부분을 접합시킨 구조로서 ANFO 폭약 등 저폭속 폭약의 폭굉속도 측정에 적용되는 제품이다. Fig. 3(b) 역시 저폭속 폭약의 폭굉속도 측정용으로 제작된 센서이지만, Fig. 3(a)와 달리 연성동관 속에 니



Fig. 4. Test preparations for preventing impulse noises.

크롬 절연저항선을 삽입하여 끝 부분을 접합시킨 구조로서 VOD PROBEROD-HS라는 시판제품이다. Fig. 3(c)는 본 실험을 위하여 자체 제작한 센서(VOD PROBEROD-ES)로서 동관을 사용하는 대신에 알루미늄박관 속에 니크롬 절연저항선을 삽입한 구조이다.

#### 4. 기폭반응실험 및 연소전파속도 측정결과

##### 4.1 실험조건

테르밋 반응 혼합제품은 구속 상태에 따라 연소반응 시 충격소음이 발생할 수 있어 Fig. 4와 같이 실험 관체를 지중 50cm에 묻고 상부에 발파매트를 설치하였다.

실험조건은 Table 2와 같이 크게 VOD PROBEROD 종류와 장약홀더 재질에 따라 구분하였으며, 장약밀

Table 2. Test conditions for measuring the VOC during thermit reactions

Type of probe sensor	Charge holder tube material	Tube inner diameter (mm)	Tube outer diameter (mm)	Specific charge (g/cc)
Original Sensor (OS)	Plastic (PC)	15	18	1.4
		17	20	1.4
	Steel (SP)	20	25	1.2
High Sensitive (HS)	Plastic (PC)	12	15	1.4
		15	18	1.4
		17	20	1.4
		20	23	1.2
	Steel (SP)	15	20	1.4
		20	25	1.4
Extremely Sensitive (ES)	Steel (SP)	15	20	1.4
		20	25	1.4

도는 1.2-1.4g/cc가 되도록 장약작업을 실시하였다.

**4.2 실험 결과**

Table 3은 구속조건 및 센서 종류별 테르밋 반응제의 연소속도 측정 실험 결과들을 나타내고 있다. 샘플명은 각각 센서 타입, 파이프 종류, 파이프 직경, 샘플 번호 순으로 정하였다. 플라스틱(PC) 재질의 장약홀더를 사용한 경우에는 점화기의 방전기폭만 발생하고 반응 혼합물의 연소반응은 일어나지 않았다. 철재(SP) 재질의 장약홀더를 사용한 경우에는 밀폐상태가 양호

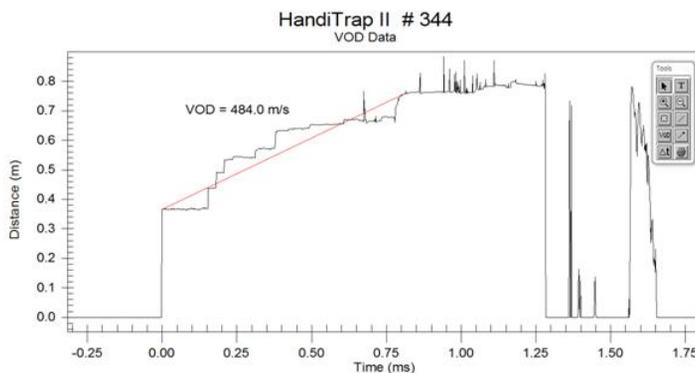
하지 못했던 HS-SP-15-2시료에 연소반응이 일어나지 않았으며, 나머지 경우 100%에 가까운 연소반응이 발생하였다.

VOD PROBEROD-OS 센서를 이용한 경우, 단선이 발생하여 연소반응측정은 불가능한 것으로 판단된다. 이러한 현상은 추가 실험에서 동일하게 발생하여 VOD PROBEROD-OS를 이용한 VOD 계측을 중지하였다.

Fig. 5는 철재 장약홀더를 사용하고 VOD PROBEROD-HS를 적용한 HS-SP-15-3 실험시료에 대한 VOD 측

**Table 3.** Recording results of the VOC during thermit reaction

Sample No.	Charge Weight (g)	Reaction completion (%)	Average VOC (m/s)	Estimated inner pressure (GPa)	Remarks
OS-PC-15-1	240	0	-	-	
OS-PC-17-1	240	0	-	-	
HS-PC-12-1	152	0	-	-	
HS-PC-15-1	240	0	-	-	
HS-PC-17-1	240	0	-	-	
HS-PC-20-1	395	0	-	-	
HS-SP-20-1	382	100	300	1.30	
OS-SP-20-1	390	100	-	0.90	
HS-SP-15-1	240	100	396	0.47	
HS-SP-15-2	230	0	-	0.55	Bad tamping
HS-SP-20-2	441	100	488	-	Tube burst
HS-SP-15-3	244	100	484	0.99	
HS-SP-20-3	460	100	-	0.27	
ES-SP-20-1	460	100	315	0.42	
ES-SP-15-1	244	100	504	-	Tube burst
ES-SP-20-2	460	100	372	0.55	
ES-SP-15-2	244	100	543	-	Tube burst
ES-SP-15-3	244	100	560	-	Tube burst



**Fig. 5.** Recording result of combustion propagation distance and collapsed time using PROBEROD-HS (HS-SP-15-3).

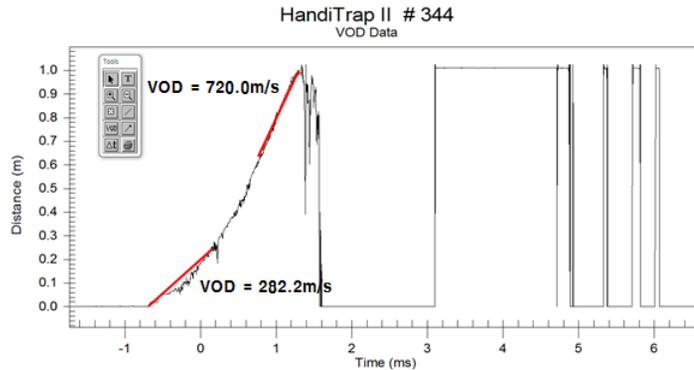


Fig. 6. Recording result of combustion propagation distance and collapsed time using PROBEROD-ES (ES-SP-15-1).

정결과를 보여주고 있다. 살펴보면, Fig. 1에서 보여주는 전형적인 VOD 측정결과와 달리 단계형상을 보이고 있어, 마치 중간 중간에 연소가 시작하는 것처럼 보이고 있다. 다시 말하면, VOD PROBEROD-HS는 테르밋 반응 혼합물의 연소전파거동을 파악하는데 무리가 있다고 판단된다. 이러한 원인으로 테르밋 반응 혼합물 내 연소전파면의 충격압력과 반응열이 구리관의 항복파괴강도와 녹는점을 상회하지 못했던 것으로 사료된다.

Fig. 6은 철재 장약홀더를 사용하고 자체개발한 VOD PROBEROD-ES를 적용한 VOD 측정결과를 보여주고 있다. Fig. 1에서 보여주는 전형적인 VOD 측정결과와 같이 연속적으로 반응거리-시간곡선을 보이고 있다. 살펴보면, 초기에는 282m/s의 아음속의 연소전파속도를 보이나 점점 가속되어 720m/s까지 증가하는 비선형적인 거동특성을 보이고 있다. 이로써 테르밋 반응 혼합물의 연소전파과정은 초기에 아음속에서 시작하여 100mm의 반응거리이상에서 급하게 가속되어 소리속도의 수배에 해당하는 속도로 연소전파가 발생하는 것을 알 수 있다. Table 3의 평균연소전파속도(Average VOC)는 VOD 측정곡선으로부터 얻은 반응시작 시각과 반응종료 시 시각의 차이와 반응 혼합물 장전 길이를 가지고 계산한 할선 연소전파속도에 해당한다. 일반적으로 폭약의 경우에는 폭약 직경이 증가함에 따라 폭굉속도가 증가하는 경향을 보이나, 테르밋 반응의 경우 연소전파속도는 오히려 감소하는 경향을 나타내고 있다. 작용압력은 연소반응 실험 전후 장약홀더의 직경변화량을 탄성이론식에 적용하여 계산한 결과로서, 경향성이 보이지는 않지

만 테르밋 반응 시 발생압력은 대략 0.5-1GPa 정도로 파악된다.

## 5. 테르밋 반응재의 연소전파속도 천이에 관한 고찰

Fig. 6에서 보여주는 바와 같이 테르밋 반응에 의한 연소전파는 비선형적인 거동이 보이고 있는데, 이것은 연소반응이 시작하여 정상적인 연소전파속도에 도달하기 전에 천이구간이 존재한다는 것을 시사하고 있다. 장약홀더 내 연소반응거리와 연소전파면의 진행시각을 비교하기 위하여 Fig. 7에 실험 후 촬영한 장약홀더 화상을 VOD 측정곡선과 겹쳐 나타내었다. Fig. 7(a)를 살펴보면, 점화기의 기폭에 의하여 혼합물이 연소반응하기 시작한 100mm 구간에서는 음속에 해당하는 220m/s 정도 연소반응속도를 보이며, 200mm 거리를 지나면서 연소 반응이 급격히 빨라져 400mm 거리에서 두 배에 가까운 연소전파속도를 보이고 있다. 그 이후 점진적으로 빨라져 음속의 두 배 이상인 706m/s까지 도달하였는데, 이러한 결과는 테르밋 반응 혼합물을 이용한 시공법에서는 동적 위력을 충분히 발휘하기 위해서 최소 200mm 이상의 반응 혼합물의 장전 길이를 확보하여야 함을 의미한다. 위 실험결과와 재현성을 확인하기 위하여 동일한 조건으로 실험한 결과를 Fig. 7(b)에 나타내었다. 최고 연소반응속도에서 약간의 차이를 보이고 있으나 연소반응거동은 거의 유사하게 나타나고 있다. 지금까지 연속적인 VOD 측정법은 폭발속도가 빠르고 충격위력이 강한 폭약 및 화약류에 성공적으로 적용되고 있으나, 테르밋 반응과 같이 연소반응속도가 느리고, 충격위력이

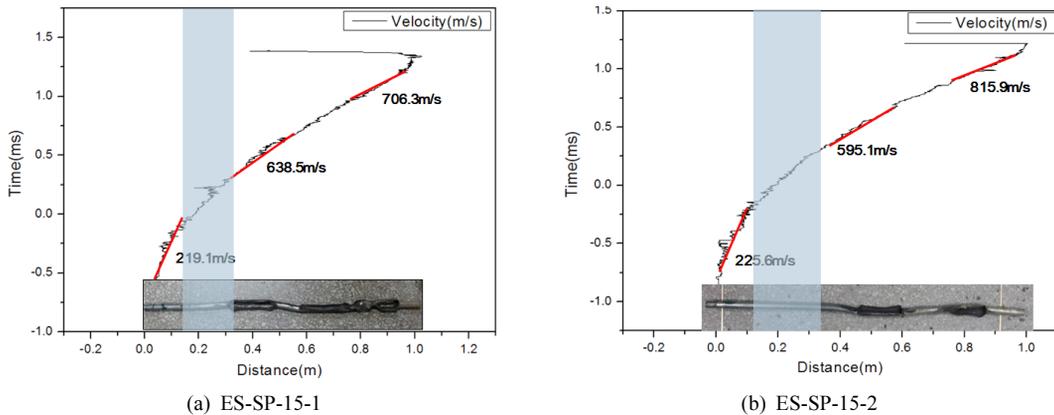


Fig. 7. Variations of combustion propagation velocity with distance.

약한 경우에 적용한 사례는 거의 없었던 것으로 알려져 있다. 또한 본 연구에서 사용한 테르밋 반응 혼합 제품은 암반 내 장약공과 같이 밀폐성이 높고 작용압력이 높게 발생하는 경우에만 연소반응이 발생하므로 안전성면에서 우수한 것으로 판단된다.

### 6. 결론

장약밀도, 전색 등과 같은 환경적 요인에 민감하게 반응하는 테르밋 반응제의 연소반응 여부 및 연소 전 파특성을 파악하기 위하여 두 종류의 상용 VOD 센서 (PROBEROD-OS, PROBEROD-HS)와 자체개발한 VOD 센서(PROBEROD-ES)를 기존의 연속적 VOD 측정 시스템에 적용하여 테르밋 반응과정에서 발생하는 연소전파속도(VOC)를 측정하였다.

그 결과, 플라스틱(PC) 재질의 장약홀더를 사용한 경우에는 점화기의 방전기폭만 발생하고 반응 혼합물의 연소반응은 일어나지 않았고, 철재(SP) 재질의 장약홀더를 사용한 경우에는 밀폐상태가 양호하지 못했던 시료를 제외하고 100%에 가까운 연소반응이 발생하였다. 철재 홀더에 VOD PROBEROD-OS 센서를 이용한 경우 단선이 발생하여 연소반응측정은 불가능한 것으로 판단되었고, VOD PROBEROD-HS 센서를 이용한 경우 혼합물 내 연소전파면의 충격압력과 반응열이 구리관의 항복파괴강도와 녹는점을 상회하지 못해 단계형상을 보여 테르밋 반응 혼합물의 연소전파 거동을 파악하는데 무리가 있다고 판단된다. 이러한 문

제점을 보완하기 위해 자체개발한 VOD PROBEROD-ES를 적용한 경우 연속적인 반응거리-시간곡선을 보이며, 초기 282m/s의 아음속의 연소전파속도를 보이거나 점점 가속되어 720m/s까지 증가하는 비선형적인 거동특성을 보였다. 즉, 연소반응이 시작하여 정상적인 연소전파속도에 도달하기 전에 천이구간이 존재하는 것으로 판단된다. 따라서 테르밋 반응 혼합물을 이용한 시공법에서는 동적 위력을 충분히 발휘하기 위해서 완전한 밀폐와 최소 300mm 이상의 반응 혼합물의 장전 길이를 확보해야 할 것으로 사료된다.

### 감사의 글

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원한 국방특화연구실 사업의 일환으로 수행되었습니다.

### 참고문헌

1. 민형동, 정민수, 박윤석, 황의진, 박준호, 2006, FINECKER Plus를 이용한 도심지 진동제어 시공사례, 화약 발파(대한화약발파공학회지), Vol. 24, No. 1, pp. 49-56.
2. 박훈, 석철기, 안중량, 강형민, 정상선, 조상호, 2013, 증기압 파쇄제를 이용한 콘크리트 파쇄 시험, 대한화약 발파공학회 추계학술발표회 논문집, 서울, pp. 37-46.
3. 안중량, 김승곤, 석철기, 박훈, 이준호, 조상호, 2012, 간이장약홀더를 이용한 콘크리트 말뚝두부의 동적파쇄에서 발생하는 지반진동과 소음에 관한 연구, 대한화약 발파공학회 추계학술발표회 논문집, 서울, pp. 67-71.
4. 이종윤, 황연수, 최학웅, 배효진, 2010, 도심지 NATM

터널 굴착시 적용된 미진동발파 공법 개선사례, 한국지반공학회 춘계 학술대회, pp. 535-542.

5. Sucasca. M., 1997, Experimental determination of detonation velocity, FRAGBLAST - International Journal of Blasting and Fragmentation, Vol, 1, pp.

261-284.

6. Jeong, Y. Y., H. M. Kang, S. H. Choi, and S. H. Cho, 2015, Dynamic expansion rock bolt for rapid installing in rocks, Geosystem Engineering, Vol. 19, No. 2, pp. 85-91.



**김민성**

전북대학교 자원에너지공학과 석사과정

Tel: 063-270-4636  
E-mail: thenext207@jbnu.ac.kr



**강형민**

전북대학교 자원에너지공학과 졸업

Tel: 010-2020-5246  
E-mail: zcszcsx@nate.com



**정상선**

구마모토대학교 사회환경공학과 박사후기과정

Tel: 080-7716-0558  
E-mail: 152d9408@st.kumamoto-u.ac.jp



**정윤영**

(주)SOC 엔지니어링 기술연구소 소장

Tel: 070-7465-8048  
E-mail: jrhope@empas.com



**박 훈**

(주)코리아카코 책임연구원

Tel: 02-834-4590  
E-mail: hujin@jbnu.ac.kr



**조상호**

전북대학교 자원에너지공학과 교수

Tel: 063-270-4636  
E-mail: chosh@jbnu.ac.kr