

동적하중을 받는 기능성 고폭화약조성 시물런트 재료물성 연구

A Study on Dynamic Material Properties of Functional High Explosive Formulation Simulant Subjected to Dynamic Loading

박정수* Jungsu Park	염기선* Kee Sun Yeom	박충희** Chunghee Park	정세환** Sehwan Jeong
	이근득* Keundeuck Lee	허훈** Hoon Huh	

ABSTRACT

This paper is concerned with the material properties of functional high explosive(FHX) simulant at various strain rates ranging from 10^{-4} /sec to 10^1 /sec. Material properties of FHX at high strain rates are important in prediction of deformation modes of FHX in a warhead which undergoes dynamic loading. Inert FHX stimulant which has analogous mechanical properties with FHX was utilized for material tests due to safety issues. Uniaxial tensile tests at quasi-static strain rates ranging from 10^{-4} /sec to 10^{-2} /sec and intermediate strain rates ranging from 10^{-1} /sec to 10^1 /sec were conducted with JANNAF specimen using a tensile testing machine, INSTRON 5583, and developed high speed material testing machine, respectively. Uniaxial compressive tests at quasi-static strain rates and intermediate strain rates were conducted with cylindrical specimen using a dynamic materials testing machine, INSTRON 8801. And cyclic compressive loading tests were performed with various strain rates and strains. Deformation behaviors were investigated using captured images obtained from a high-speed camera.

Keywords : Functional High Explosive Formulation(FHX, 기능성 고폭화약조성), Simulant(시물런트) Uniaxial Tensile Test(단축인장시험), Uniaxial Compressive Test(단축압축시험), Cyclic Compressive Loading Test(주기압축하중시험), Strain Rate(변형률속도)

1. 서론

현대 무기체계 탄두에 충전되는 화약은 무기체계가 요구하는 성능 및 운용조건에 따른 안전성과 종말효과 극대화를 위하여 기능성 고폭화약조성(FHX : Functional High Explosive Formulation)의 적용이 갈수록 증대되고 있다. 특히 무기체계 운용상 동적하중이 작용하는 탄두에 충전된 기능성 고폭화약조성에는 탄

† 2013년 6월 10일 접수~2013년 9월 27일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

** 한국과학기술원(KAIST) 기계항공시스템학부
책임저자 : 박정수(pjs@add.re.kr)

두의 최종 폭발시점 이전에 작용하는 동적하중에 의하여 변형이 발생하여 정상적인 화약 기폭조건을 악화시키거나 심한 경우 예기치 않는 폭발현상을 유발할 수 있기 때문에 운용조건 중에 기능성 고폭화약조성에 작용하는 동적하중에 대한 탄두 안전성을 확보할 수 있는 설계기술이 요구되고 있다.

본 연구의 주 재료인 기능성 고폭화약조성은 무기체계별로 요구되는 성능과 둔감도 특성을 만족할 수 있도록 특화되어 개발된 복합화약조성을 말한다. 복합화약조성은 기존 재래식 화약이 갖고 있는 운용 취약성을 크게 개선시키면서도 성능은 동등 이상으로 향상시킨 화약조성으로서 현재 첨단 유도무기 탄두에 대부분 적용되고 있으며 기능성 고폭화약조성은 복합화약조성 중에서도 좀 더 세부적으로 무기체계 요구조건을 만족시킨 첨단 화약조성이라 할 수 있다. 이와 같이 무기체계에 최적화된 기능성 고폭화약조성을 탄두에 적용하기 위해서는 탄두 운용조건에 적합한 특성을 확보할 수 있는 설계기법이 매우 중요하다. 특히 견고표적을 침투하여 파괴하는 침투형 탄두에 적용되는 기능성 고폭화약조성의 경우에는 극심한 운용조건에 따른 화약조성의 생존성이 매우 중요하므로 이를 만족할 수 있는 내충격성을 갖는 화약조성 개발이 필수적이라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서 수행하고자 하는 기능성 고폭화약조성의 동적 재료물성 연구는 내충격성이 요구되는 기능성 고폭화약조성의 동적 재료물성을 측정하고 이를 분석하여 기능성 화약조성의 동적 변형거동 특성을 살펴보고자 한다.

일반적으로 탄두에 충전되는 기능성 고폭화약조성에 동적하중이 작용할 경우 발생하는 응력과 변형률 관계는 관련 물성 측정실험을 수행하고 이를 바탕으로 복합화약조성의 구성방정식 모델을 형상화하여 응력-변형률 관계를 규정하게 된다. 복합화약조성인 기능성 고폭화약조성은 입상형태의 분자화약과 이를 물리 화학적으로 결합시키는 고분자 결합제, 원료화약의 반응특성을 향상시키기 위한 산화제, 그리고 기계적 성질을 개선하기 위한 가소제로 이루어진 입상제 기반 고분자 복합재료이기 때문에 응력 변형률 관계는 비선형적 변형거동을 보이고 변형률속도에 따라 재료물성의 민감도가 증가하기 때문에 관련된 많은 물성 시험자료가 요구된다. 또한 일반 기계재료에 비하여 강성이 매우 낮은 복합재료의 특성으로 인하여 지그 선정을 포함한 시험기법 적용에 세심한 주의가 요구된다. 기능성 고폭화약조성의 동적물성 측정을 위하여

기준에 수행되었던 복합화약조성 및 고분자 재료의 물성시험 및 구성모델 개발 연구내용을 살펴보면 다음과 같다.

Peeters 등^[1]은 복합화약조성과 기계적 물성이 유사한 비활성 물질에 대하여 상태방정식 크리프 모델과 선형 점탄성 모델을 구성하고 변형률속도에 따른 단축 크리프 시험, 주기적 하중 시험, 응력완화 시험 등을 해석하고 이를 실험결과와 비교 후 모델의 타당성을 논하였다. Gray III 등^[2]은 PBX 9501, X0242-92-4-4, PBXN-9 등의 복합화약 뿐만 아니라 이들 복합화약의 결합제로 사용되는 중합체에 대하여 고변형률속도와 저변형률속도에서 압축시험을 실시하여 화약-결합제의 비율, 화약-결합제 간의 결합 시스템, 화약의 구조식 등이 복합화약에 미치는 영향을 연구하였다. 모든 복합화약에서 변형률속도가 증가함에 따라 탄성계수, 최대 유동응력, 최대응력에서의 변형률 값이 증가하는 경향을 보였다. 또한 고변형률속도에서 복합화약의 파괴 모드가 변하는 것도 관찰하였다. Foster Jr. 등^[3]은 PBXN 109 복합화약에 대하여 원통형 시편을 제작하여 69 m/s의 고변형률속도에서의 압축시험을 실시하고 인장시험 시편을 SEM 분석하여 복합화약의 고변형률속도에서의 기계적 특성과 미시적 구조에 관하여 연구하였다. Millett 등^[4]은 복합화약의 결합제로 많이 사용되는 polychloro-prene과 같은 탄성중합체에 대하여 75 mm와 50 mm 가스건을 이용한 평판 충격시험을 수행하여 고변형률속도에서의 기계적 특성을 연구하였다. Idar 등^[5]은 PBX 9501 복합화약에 대하여 결합제의 조성, 온도, 변형률속도에 따른 기계적 특성에 대하여 연구하였다. 0.01/sec과 0.1/sec의 변형률속도, -15, 23, 50°C의 온도 조건하에서 준정적 압축시험을 실시하였고, 0.02/sec과 0.2/sec의 변형률속도에서 준정적 인장시험을 수행하였다. 또한 2000/sec 부근의 변형률속도, -15, 50°C의 온도 조건하에서 SHPB(split Hopkinson pressure bar) 장비를 이용하여 고변형률속도에서의 압축시험을 실시하였다. Lochert 등^[6]은 PBXN-109 복합화약에 대하여 만능시험기를 이용하여 50 mm/min의 인장속도에서 JANNAF 시편의 인장시험을 수행하고 최대 하중에서의 응력과 변형률, 탄성계수를 관찰하였다. Grantham 등^[7]은 2300/sec의 변형률속도에서 SHPB 장비를 이용하여 복합화약의 시플런트인 PBS9501의 브라질리안 시험을 실시하여 고변형률속도에서의 복합화약의 변형거동을 관찰하였다. Cady 등^[8]은 extrude Estane, plasticized Estane, plasticized hydroxyl

-terminated poly-butadiene의 세 가지 결합제에 대하여 -75~23℃의 온도 범위, 0.001~2800/sec의 변형률속도 범위에서 압축시험을 실시하여 온도와 변형률속도에 따른 Estane 결합제의 기계적 특성을 분석하였다. Siviour 등^[9]은 복합화약의 대표적인 시물런트인 PBS에 대한 고변형률속도에서의 기계적 특성에 관하여 연구하였다. -80~22℃의 온도 조건에서 2000/sec의 고변형률속도의 기계적 특성을 소개하면서 중고속 변형률속도에서 기계적 특성의 중요성을 언급하고 있다. Quidot 등^[10]은 원료화약인 RDX와 HTPB 바인더 그리고 알루미늄 입자가 첨가된 복합화약조성에 대하여 일반화된 maxwell 점탄성 모델로부터 CMEX(constitutive model for cast explosives) 점탄성 모델을 보정하였다. CMEX 모델 보정을 위하여 준정적 상태의 인장시험, Split Hopkinson Pressure Bar 시험장치의 압축시험 물성값들이 적용되었다.

본 연구에서는 기능성 고폭화약조성에 대한 동적물성 시험의 위험성을 고려하여 기능성 고폭화약조성과 기계적 물성이 유사한 시물런트(simulant)를 이용하여 관련 물성시험을 수행하였다. 이에 본 논문에서 기능성 고폭화약조성 시물런트라는 용어를 사용하며 이는 기능성 고폭화약조성과 유사한 기계적 물성을 가지는 것을 의미한다. 본 논문에서는 기능성 고폭화약조성 시물런트의 동적물성을 획득하기 위하여 $10^{-4} \sim 10^{-2}$ /sec의 준정적 변형률속도와 $10^{-1} \sim 10^1$ /sec의 중고속 변형률속도에서 JANNAF 규격 시편을 사용한 인장시험을 수행하였다. 또한 준정적과 중고속 변형률속도 조건에서 실린더형 시편을 이용한 단축압축시험을 수행하고 관련 동적물성을 획득하였다. 압축시험에서는 추가적으로 주기적인 하중부하에 따라 기능성 고폭화약조성 시물런트의 응답변화를 살펴보기 위하여 변형률속도 및 변위 진폭을 달리하여 응력-변형률 선도를 관찰하였고 반복적인 주기하중에 대한 시물런트 재료물성 변화를 분석하였다.

2. 시편 제작 및 시험 조건

가. 재료물성 측정시편 제작

기능성 고폭화약조성 시물런트는 분자화약을 대신하여 황산암모늄, 탄산칼슘, 황에 고분자 결합제를 혼합하여 경화시킨 형태이며 시물런트를 이용하여 단축인장시험을 실시함에 있어 기존 금속재료 등에 사용

하던 두께가 얇은 형태의 인장시편을 사용하는 것이 불가능하다. 따라서 미국의 JANNAF(Joint Army Navy NASA Air Force) Interagency Propulsion Committee에서는 Fig. 1과 같은 복합화약의 인장시험용 규격을 제안하였다. 본 연구에서는 JANNAF에서 제안한 규격으로 기능성 고폭화약조성 시물런트의 인장시편을 제작하여 단축인장시험을 수행하였다. 시물런트 제조과정은 기능성 고폭화약조성과 동일하여 황산암모늄, 탄산칼슘, 황에 결합제, 가소제, 경화제를 첨가하고 혼합, 주조, 경화과정을 거쳐서 제작한다. 주조된 시물런트를 두께 12.7 mm의 판 형태로 절단하고 JANNAF 시편 형태의 금형으로 펀칭하여 인장시편을 제작하였다. JANNAF 시편의 표점부의 너비는 9.5 mm, 두께는 12.7 mm이다.

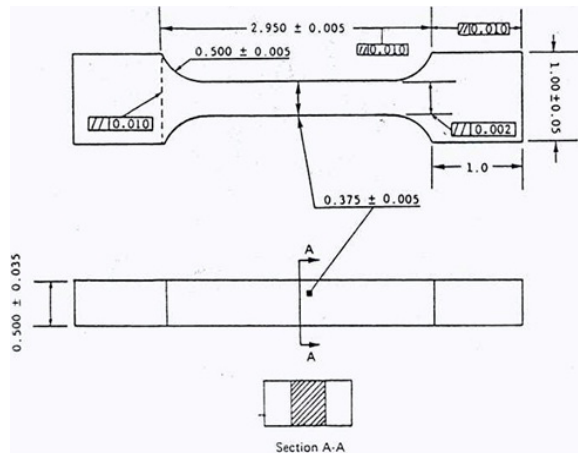


Fig. 1. JANNAF 규격 시편

기능성 고폭화약조성 시물런트의 단축압축시험과 주압축하중시험에는 실린더형 시편을 사용하였다. 압축시편의 크기는 Fig. 2와 같으며 중고속 단축압축시험을 고려하여 지름 대 높이의 비가 1이 되도록 제작하였다.

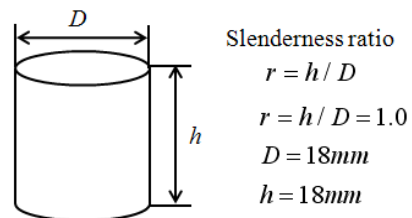


Fig. 2. 압축시험 시편 규격

단축인장시험이 진행되는 동안 인장시편의 변형거동을 자세하게 관찰하고 변형률 측정을 용이하게 하기 위하여 인장시편의 표점부에 1 mm 간격으로 격자를 표시하였다. 격자를 표시한 인장시험 시편을 Fig. 3에 도시하였다.



Fig. 3. 격자가 표시된 복합화약 시뮬란트의 단축인장 시편

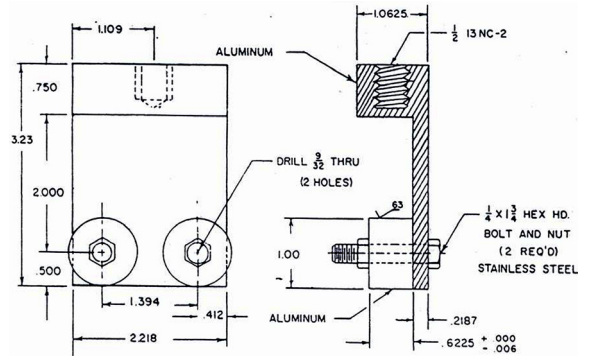
나. 재료물성 측정시험 조건

1) 인장시험 조건

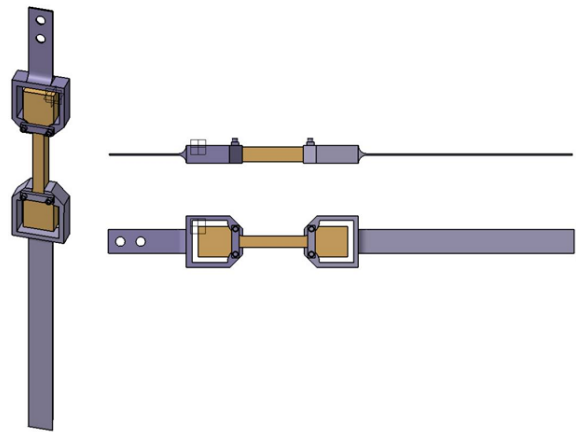
JANNAF 시편을 이용한 준정적 단축인장시험은 INSTRON 5583 재료시험기를 사용하여 $10^{-4} \sim 10^{-2}/\text{sec}$ 의 변형률속도에서 수행하였으며, 중고속 인장시험은 자체 제작한 Fig. 4의 고속재료시험기를 사용하여 $10^{-1} \sim 10^1/\text{sec}$ 변형률속도에서 수행하였다. 재료물성 시험과정의 영상을 기록하여 시험이 진행되는 동안 재료의 변형거동을 관찰할 수 있도록 하였다. 모든 물성시험은 상온에서 실시하였다. Fig. 5는 JANNAF에서 제안한 인장시험용 그림과 본 연구에서 제작한 인장시험용 그림을 나타내고 있다. JANNAF에서 제안한 그림은 준정적 인장시험을 수행하기 위하여 설계된 지그로 준정적 인장시험에는 그대로 사용이 가능하나 하중이 급격하게 가해지는 중고속 인장시험에서는 하중 방향의 수직인 방향으로 작용하는 시편의 자유도로 인하여 인장시험 도중 시편이 움직일 가능성이 많은 것과 관성효과에 의한 하중의 떨림 현상이 발생할 수 있는 문제점이 있다. 이 같이 중고속 인장시험에서 발생할 수 있는 JANNAF 그림의 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 시편의 움직임을 제안하도록 고정부품을 추가하였으며 하중의 떨림 현상이 방지되도록 지그 질량을 최대한 줄여 설계하였다. 지그 질량을 줄임으로서 지그의 강성이 감소하여 중고속 인장시험에서 갑작스런 하중 작용 시 지그가 양쪽으로 벌어질 가능성이 있는데 이 또한 위에서 설명한 고정부품이 방지할 수 있다.



Fig. 4. 고속재료시험기



(a) JANNAF 규격 그림(단위 : Inch)



(b) 설계/제작된 인장시험용 그림

Fig. 5. 인장시험용 그림 비교

2) 압축시험 조건

압축시험에서 시편 양 끝단에 압축하중이 작용할 경우 시편 양 끝단에는 압축변위를 부과하기 위하여 Fig. 6과 같이 testing plate와 맞닿게 된다. 이 때 시편의 양 끝단과 testing plate 사이에는 마찰력이 존재하여 마찰력은 시편 양 끝단에 작용하여 Fig. 6과 같이 반경방향의 변형을 구속하게 되어 시편은 균일한 압축변형을 하지 않고 시편 가운데 부분이 볼록해지는 베럴링(barrelling) 현상이 발생한다. 베럴링 현상이 발생하게 되면 시편 내부에 응력-변형률이 균일하지 않아 시편의 거시적인 변형과 그에 따른 반력을 측정하여 물성치를 획득하는데 어려움이 발생하게 된다.

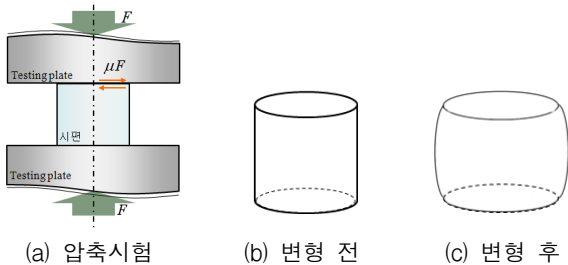


Fig. 6. 압축시험에서의 베럴링 현상

본 연구의 시물런트 압축시험에서도 베럴링 현상이 발생하였으며 이를 해결하기 위해서 시편과 testing plate 사이에 마찰력을 완화시키는 윤활조건을 설정하였다. 여러 윤활조건 중 본 연구에 적용된 윤활조건은 testing plate에 테프론 필름(teflon film)을 코팅한 후 윤활제로 그리스(grease)를 적용한 것이 베럴링 현상을 최소화 할 수 있었다. Fig. 7은 시물런트 압축시험과정을 고속카메라로 촬영한 것으로 윤활조건 도입 후에는 베럴링 현상이 나타나지 않은 것을 알 수 있다.

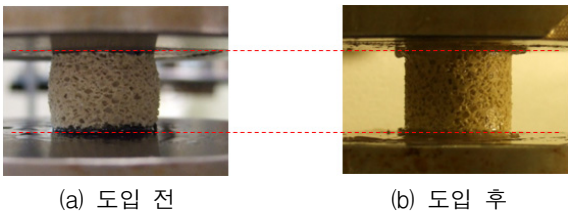


Fig. 7. 윤활조건 도입 전·후 베럴링 현상 비교

3) 주기 부하-제하 반복시험 조건

주기적인 압축하중의 시물런트 응답특성을 관찰하

기 위한 시험조건 1은 동일진폭 10회 반복압축하중에 대하여 변형률속도 $10^{-3}/\text{sec} \sim 10^0/\text{sec}$ 까지 수행하였고 각각의 변형률속도 조건에서 변형률을 0.05에서 0.20까지 변화시키면서 시험을 수행하였다. 시험조건 2는 $10^{-3}/\text{sec} \sim 10^0/\text{sec}$ 까지의 변형률속도에서 순차적으로 최대 압축변형률을 증가시키면서 반복하중시험을 수행하였다. Table 1은 부하-제하 반복시험 조건을 정리하여 나타내고 있다.

Table 1. 부하-제하 반복하중 시험조건

시험구분	변형률속도 [1/sec]	최대 변형률
조건 1 (동일진폭 10회 반복)	10^{-1}	0.05
		0.10
		0.15
	100	0.20
		0.05
		0.10
조건 2 (4단계 순차 하중 조건)	100	0.15
		0.20
		0.05
		0.10

3. 시험 결과

가. 인장시험 결과

단축인장시험이 진행되는 동안 시험 장면을 기록한 동영상으로부터 일정한 시간 간격으로 이미지를 추출하여 Fig. 8에 도시하였다. Fig. 8은 $10^{-2}/\text{sec}$ 의 인장시험으로부터 추출한 그림이다.

변형거동의 균일성을 파악하기 위하여 인장시편 표점부 내의 상부, 중부, 하부에 위치한 격자의 변형률을 측정하여 Fig. 9에 도시하였다.

표점부의 상부, 중부, 하부에서 측정된 변형률이 시간에 따라 일정함을 확인할 수 있고, 따라서 기능성 고풍화약조성 시물런트의 단축인장시험이 진행되는 동안 표점부에서는 균일한 변형이 발생한다고 판단할 수 있다.

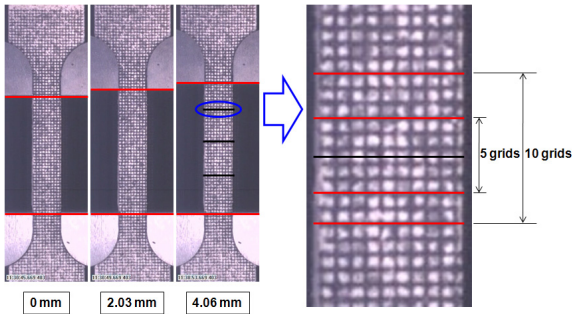


Fig. 8. 인장시험 진행 중 시편의 이미지 추출 및 격자에서의 변형률 측정

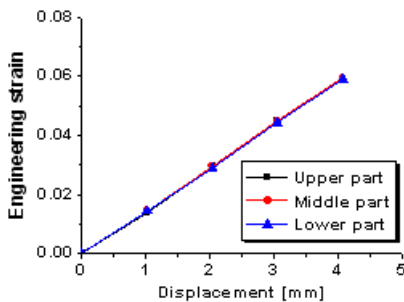


Fig. 9. 표점부 내의 상부, 중부, 하부의 격자에서 측정 한 변형률

다양한 변형률속도 조건 하에서 수행된 단축인장시험의 공칭응력-공칭변형률 선도를 Fig. 10에 도시하였다. 변형률속도가 증가할수록 유동응력이 증가하는 것을 관찰할 수 있다. $10^2/\text{sec}$ 에서의 최대 유동응력은 $10^{-4}/\text{sec}$ 에서의 최대 유동응력에 비하여 약 200% 이상 증가한 것을 확인할 수 있다.

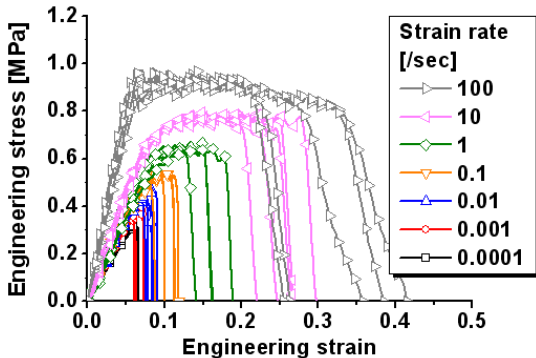


Fig. 10. 변형률속도에 따른 단축인장시험의 공칭응력-공칭변형률 선도

나. 압축시험 결과

다양한 변형률속도 조건 하에서 기능성 고품화약조성 시물런트에 대한 단축압축시험의 공칭응력-공칭변형률 선도를 Fig. 11에 도시하였다. 단축압축시험 결과에서도 단축인장시험 결과와 마찬가지로 변형률속도가 증가함에 따라 유동응력이 증가하는 변형률속도 민감도를 확인할 수 있었다. 또한 단축인장시험에 비하여 단축압축시험에서 파단연신율이 상당히 증가한 것을 관찰할 수 있다.

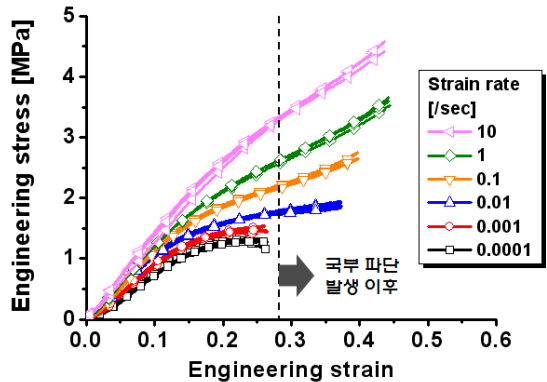


Fig. 11. 변형률속도에 따른 단축압축시험의 공칭 응력-공칭변형률 선도

압축시험 결과로부터 기능성 고품화약조성 시물런트는 동일한 변형률속도에서 인장응력보다 압축응력이 크게 나타나고 있으며 변형률속도에 대한 압축응력-변형률 관계의 증가폭이 인장응력-변형률 관계보다 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

다. 주기 부하-제하 반복하중시험 결과

시험조건 1에서 변형률속도 $10^{-1}/\text{sec}$ 의 부하-제하 반복 압축하중시험 결과를 Fig. 12에서 Fig. 16까지 나타내었다. 변형거동의 특성을 살펴보면 제하 상태에서 급격한 하중의 감소 현상이 나타나고 있으며 1차 부하 곡선보다 현저히 감소한 2차 부하 곡선을 관찰할 수 있어 2회 주기 이후로 부하 곡선의 경향이 변화된 것을 알 수 있다. 반면에 제하 곡선의 경우는 거의 일정한 경향성을 유지하는 것을 볼 수 있었다. 주기 압축하중 이후의 응력-변형률 관계는 수렴하는 경향을 가지는 것으로 보이며 이는 Fig. 16의 주기변화에 따른 최대 압축응력 변화에서 명확하게 나타나고 있다. Fig. 16에서 주기 압축하중이 반복됨에 따라 응력완화 현

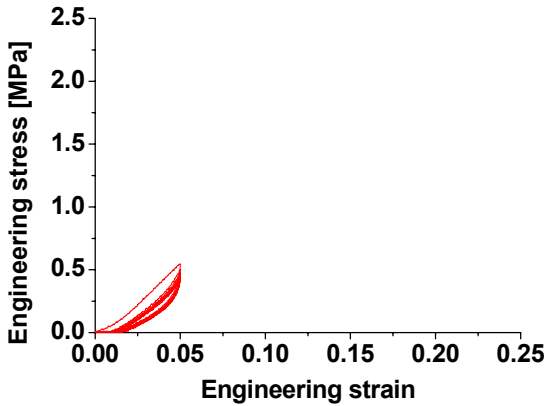


Fig. 12. 부하-제하 반복 압축하중시험 결과(조건 1)
(변형률속도 : $10^{-1}/\text{sec}$, 최대변형률 : 0.05)

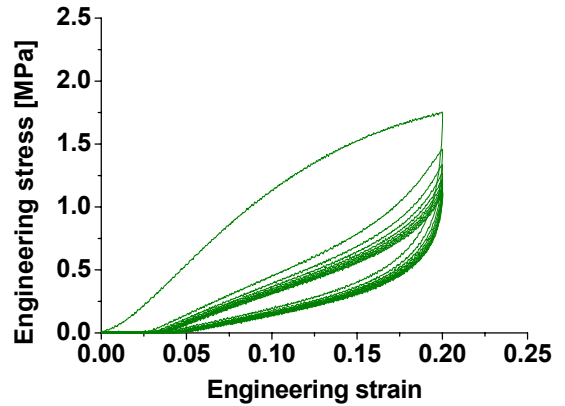


Fig. 15. 부하-제하 반복 압축하중시험 결과(조건 1)
(변형률속도 : $10^{-1}/\text{sec}$, 최대변형률 : 0.20)

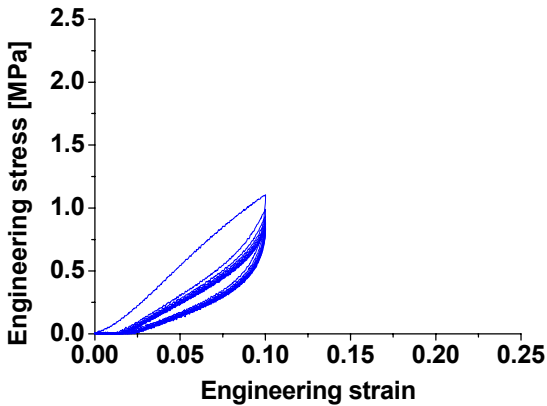


Fig. 13. 부하-제하 반복 압축하중시험 결과(조건 1)
(변형률속도 : $10^{-1}/\text{sec}$, 최대변형률 : 0.10)

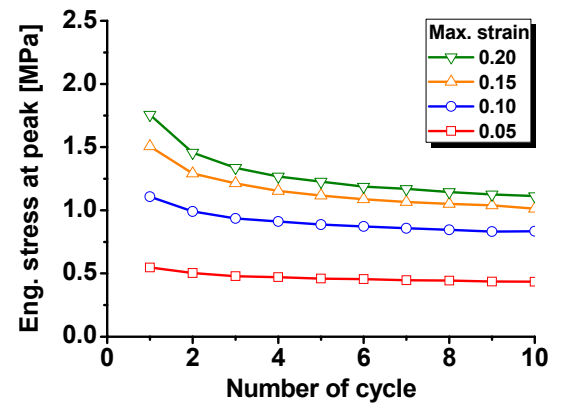


Fig. 16. 주기변화에 따른 최대 압축응력 변화(조건 1,
변형률속도 $10^{-1}/\text{sec}$)

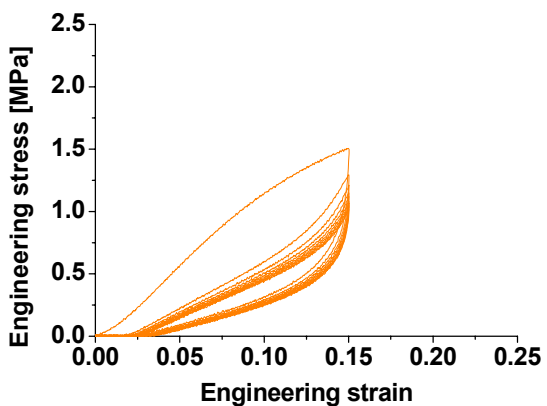


Fig. 14. 부하-제하 반복 압축하중시험 결과(조건 1)
(변형률속도 : $10^{-1}/\text{sec}$, 최대변형률 : 0.15)

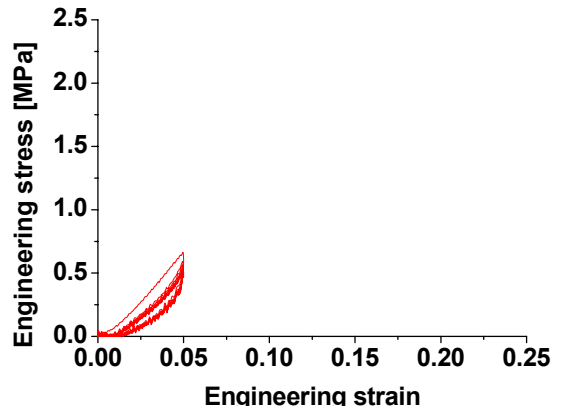


Fig. 17. 부하-제하 반복 압축하중시험 결과(조건 1)
(변형률속도 : $10^0/\text{sec}$, 최대변형률 : 0.05)

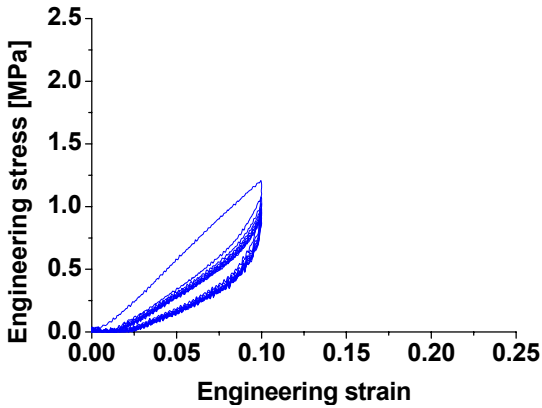


Fig. 18. 부하-제하 반복 압축하중시험 결과(조건 1)
(변형률속도 : 10^0 /sec, 최대변형률 : 0.10)

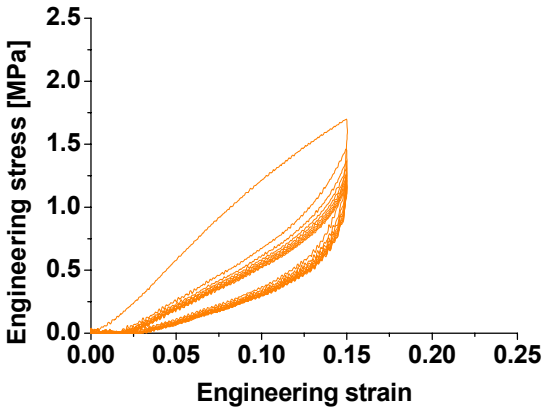


Fig. 19. 부하-제하 반복 압축하중시험 결과(조건 1)
(변형률속도 : 10^0 /sec, 최대변형률 : 0.15)

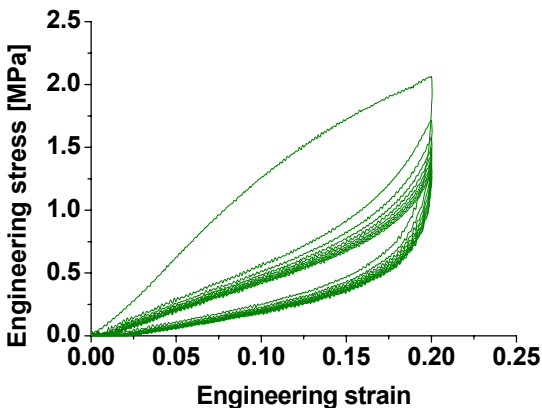


Fig. 20. 부하-제하 반복 압축하중시험 결과(조건 1)
(변형률속도 : 10^0 /sec, 최대변형률 : 0.20)

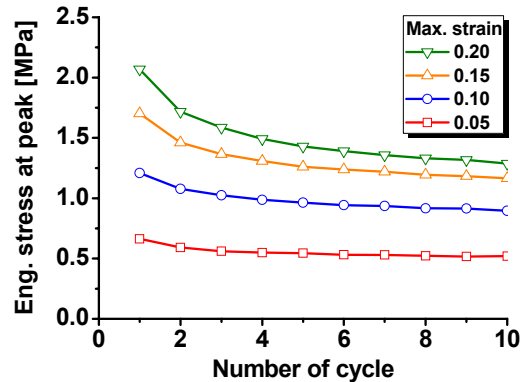


Fig. 21. 주기변화에 따른 최대 압축응력 변화(조건 1, 변형률속도 10^0 /sec)

상이 발생함을 알 수 있으며 완화정도는 변형률속도와 최대 변형률이 증가하면서 반복되는 하중에서 커지는 것을 볼 수 있고 시험조건 1에서 최대 33%의 응력완화현상이 발생한 것을 알 수 있었다. 변형률속도 10^0 /sec에서 실시한 부하-제하 반복하중 시험에서도 변형률속도 10^{-1} /sec에서 나타난 거동과 유사한 시험결과를 얻을 수 있었다.

Fig. 22는 부하-제하 하중반복시험에서 시험조건 2의 결과를 나타내고 있다. 시험결과를 분석해보면 최대변형률 0.05의 반복하중시험 중에는 시험조건 1의 최대 압축변형률 0.05인 시험과 동일한 결과를 보인다. 차이점을 보이는 것은 최대 압축변형률 0.05에서 10회 반복하중을 완료하고 최대 압축변형률 0.10으로 부하가 진행될 때이다. 시험조건 1의 최대 압축변형률 0.10의 시험에서는 시험에 아무런 손상이 없는 초기상태에서 부하가 진행되므로 무손상 상태의 부하 곡선을 따라 변형이 발생하지만 시험조건 2의 경우에는 앞서 최대 변형률 0.05에서 누적된 손상이 최대 변형률 0.10의 부하 상태에 영향을 미치므로 1단계의 제하 곡선을 그대로 따라 진행하다가 무손상 상태의 부하 곡선에 도달하면 이후 무손상 상태의 부하 곡선을 따라 변형이 진행된다. 이러한 변형 거동은 최대 변형률 0.15와 0.20의 첫 번째 부하 곡선에서도 관찰할 수 있다. 이는 첫 번째 주기에서의 응력보다 그 이후 주기에서의 응력이 점점 완화되는 현상인 Mullins 효과가 기능성 고풍화약조성 시뮬런트에 나타나는 것으로 설명이 가능하다 할 수 있다. 변형률속도와 최대 압축변형률을 변화시키면서 실시한 부하-제하 반복하중시험 결과로부터 기능성 고풍화약조성 시뮬런트는

주기가 반복됨에 따라 응력완화현상과 이력현상이 발생하는 것을 알 수 있었고 이 같은 결과는 향후 기능성 고풍화약조성 설계에 중요한 재료물성 자료로 활용이 기대된다.

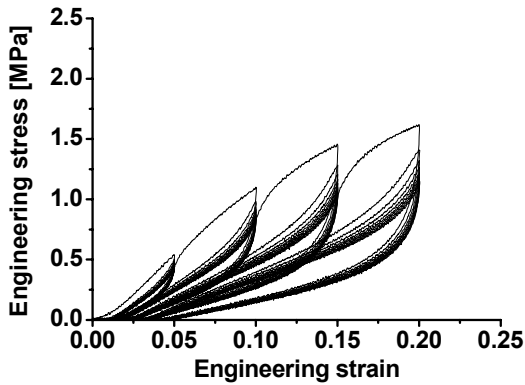


Fig. 22. 부하-제하 반복하중시험 결과(조건 2)

4. 결론

본 논문에서는 기능성 고풍화약조성의 동적 재료물성을 획득하기 위하여 준정적 및 중고속 변형률속도에서 기능성 고풍화약조성 시뮬런트의 단축인장시험, 단축압축시험, 주기 반복하중시험을 수행하였다. 다양한 변형률속도 조건에서의 시뮬런트에 대한 재료시험을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 다양한 변형률속도 조건하에서 시뮬런트의 재료시험을 수행하고 시험장면을 고속카메라로 기록하여 기능성 고풍화약조성 시뮬런트의 변형거동을 자세히 관찰하고 변형특성을 파악하였다.
- (2) 단축인장시험의 결과로 변형률속도가 증가함에 따라 유동응력과 파단연신율이 증가하였으며 이를 통하여 인장시험에 대한 시뮬런트의 민감도 특성을 알 수 있었다.
- (3) 단축압축시험을 통해서도 시뮬런트의 변형률속도 민감도를 확인하였으며, 단축압축시험의 변형률속도 민감도가 단축인장시험보다 크게 나타나는 것을 확인하였다.
- (4) 주기압축하중시험을 실시하여 주기가 증가할수록 유동응력이 완화되는 현상과 응력이력현상이 발생하는 것을 실험적으로 관찰할 수 있었다. 이는 복

합화약 시뮬런트에 손상이 축적된 것으로 이해할 수 있으며 이 같은 재료물성은 기능성 고풍화약조성 설계에 기본 자료로 활용이 기대된다.

References

- [1] Peeters, R. L. and Hackett, R. M., "Constitutive Modeling of Plastic-bonded Explosives", *Experimental Mechanics*, Vol. 21, pp. 111~116, 1981.
- [2] Gray III, G. T., Idar, D. J., Blumenthal, W. R., Cady, C. M., and Peterson, P. D., "High- and Low-strain Rate Compression Properties of Several Energetic Material Composites as a Function of Strain Rate and Temperature", 11th International Detonation Symposium, 1998.
- [3] Foster Jr., J. C., Glenn, J. G., and Gunger, M., "Meso-scale Origins of the Low-pressure Equation of State and High Rate Mechanical Properties of Plastic Bonded Explosives", *Shock Compression of Condensed Matter - 1999*, pp. 703~706, 2000.
- [4] Millett, J. C. F. and Bourne, N. K., "Shock Response of the Elastomer, Polychloroprene", *Journal of Applied Physics*, Vol. 89, pp. 2576~2579, 2001.
- [5] Idar, D. J., Thompson, D. G., Gray Iii, G. T., Blumenthal, W. R., Cady, C. M., Peterson, P. D., Roemer, E. L., Wright, W. J., and Jacquez, B. J., "Influence of Polymer Molecular Weight, Temperature, and Strain Rate on the Mechanical Properties of PBX 9501", *Shock Compression of Condensed Matter - 2001*, pp. 821~824, 2002.
- [6] Lochert, I. J., Dexter, R. M., and Hamshere, B. L., "Evaluation of Australian RDX in PBXN-109", DSTO-TN-0440, Edinburgh, South Australia, 2002.
- [7] Grantham, S. G., Siviour, C. R., Proud, W. G., and Field, J. E., "High-strain Rate Brazilian Testing of an Explosive Simulant", *Measurement Science and Technology*, Vol. 15, pp. 1867~1870, 2004.
- [8] Cady, C. M., Blumenthal, W. R., Gray, G. T., and Idar, D. J., "Mechanical Properties of Plastic-bonded Explosive Binder Materials as a Function of Strain-rate and Temperature", *Polymer Engineering and Science*, Vol. 46, pp. 812~819, 2006.

- [9] Siviour, C. R., Laity, P. R., Proud, W. G., Field, J. E., Porter, D., Church, P. D., Gould, P., and Huntingdon-Thresher, W., “High Strain Rate Properties of a Polymer-bonded Sugar : Their Dependence on Applied and Internal Constraints”, Proc. R. Soc. A, pp. 1229~1255, 2008.
- [10] Michel Quidot, Patrick Racimor, Philippe Chabin, “CMEX PROJECT : Development of a Constitutive Model for Cast Plastic Bonded Explosives”, 12th International Detonation Symposium, 2002.