

알루미나의 방탄특성에 대한 입경의 영향

백용기 · 강을손 · 정동익 · 최원봉

국방과학연구소

(1992년 2월 20일 접수)

Effect of Grain Size on the Ballistic Performance of Alumina Ceramics

Yong-Kee Baek, Eul Son Kang, Dong-Ik Cheong and Won-Bong Choi

Agency for Defense Development

(Received February 20, 1992)

요 약

평균입경이 각각 1 μm 과 51 μm 인 두 종류의 완전히 치밀화된 알루미나 시편을 제조하여, 저속변형을 조건하에서의 기계적 특성(파괴강도 및 파괴인성)과 음속 및 탄성, 그리고 Caliber 50 AP탄자에 대한 고속변형을 조건하에서의 방탄능을 측정하였다. 저속변형을 조건하에서의 기계적 특성은 평균입경이 작은 시편이 월등히 우수하였다. 즉, 평균입경이 51 μm 인 시편은 131 MPa 및 $3.01 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 의 낮은 파괴강도와 파괴인성을 보인 반면, 평균입경이 1 μm 인 시편은 349 MPa 및 $4.23 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 의 높은 파괴강도와 파괴인성을 나타내었다. 그리고 입경 차이에 따른 탄성계수 및 음속의 차이는 대부분 1.5~2.0% 이내에 있었으나 체적 탄성계수와 체적파 속도는 입경이 큰 시편이 각각 9%와 4% 정도 더 큰 값을 나타내었다. 한편 이들 시편의 방탄능은 저속변형을 조건하에서의 기계적 특성과는 달리, 오히려 입경이 큰 시편이 28% 이상 우수하였는데, 탄속이 860 m/s일 때 입경이 작은 시편의 방탄효율은 A16061-T6 대비 4.00이었으나, 입경이 큰 시편은 5.13의 높은 값을 나타내었다.

ABSTRACT

Two kinds of alumina specimens with different grain size (1 and 51 μm) but same density were prepared by hot-pressing. Fracture strength and fracture toughness of these specimens at low strain rate, sonic velocity, and elastic property were evaluated. Ballistic performance against Cal. 50 AP projectile was characterized by thick-backing method by using A16061-T6 reference block. Mechanical properties measured at low strain rate showed that the specimen with small grain (SG) were better than specimen with large grain (LG). Fracture strength and fracture toughness of LG specimen were 131 MPa and $3.01 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, but those of SG specimen were 349 and 4.23, respectively. Sonic velocity and elastic properties of these specimen were similar, but bulk velocity and bulk modulus were different at amount of 4 and 9%. The tendency of ballistic performance was not consistent with the mechanical properties at low strain rate. The ballistic performance based on quantitative efficiency revealed that the LG specimen (5.13) was ballistically better than the SG specimen (4.00) in spite of their lower mechanical properties.

1. 서 론

경량, 고경도 소재인 요업체는 이미 오래전부터 장갑재로 이용되고 있다. 그리고 현재에는 개인 장갑에서부터 전투헬기 및 최신형 전차에 이르기까지 이를 채택한 다양한 무기체계가 개발되어 실제 사용되고 있다^{1,2)}.

요업체를 방탄판으로 사용함과 더불어 응용, 개발 및

성능 평가 등에 관한 많은 연구가 30여년전부터 시작되었는데, 지금까지의 연구는 응용이나 적용을 위한 경험적 연구가 주종을 이루고 있을뿐, 방탄파괴 기구의 극도의 복잡성으로 말미암아, 파괴 기구 자체를 이해하기 위한 근본적이고 체계적인 연구 등은 별로 이루어진 바가 없었으며, 주로 실험결과에 대한 분석, 보고에 한정되어 있었다¹⁻³⁾. 특히 요업체의 방탄특성과 관련된 연구결과

들을 분석하면, 아직은 용융체의 어떠한 물성이 방탄특성에 어느 정도의 영향을 미치는 것인지 확실히 인지된 바 없으며, 그 경향성마저도 거의 일관성을 상실하고 있다. 그리하여 최근에는 지금까지의 기계적 물성 변수가 아닌 미세구조적 변수와 용융체의 방탄물성간의 정량적 상호관계를 도출하려는 새로운 연구가 시작되고 있다⁶⁻⁹⁾.

본 연구에서도 이러한 새로운 연구의 일환으로, 미세구조적 변수의 하나인 평균입경을 크게 변경시킨 알루미늄 용융체를 제조하여, 이의 방탄물성을 측정, 상호비교함으로써, 입경차이에 따른 방탄물성의 특성 변화 및 이것이 방탄파괴 기구에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다.

2. 실험방법

2.1. 시편제조 및 정적특성 평가

입경 차이가 매우 큰 두 종류의 완전 치밀화된 알루미늄 시편을 제조하기 위하여 본 연구에서는 가압 소결로(hot press)를 사용하였다. 가압소결온도 및 시간은 각각 1500°C, 1시간(SG 시편)과 1850°C, 3시간(LG 시편)이었으며, 두 시편 공히 Ar분위기, 17 MPa 조건하에서 소결하였다. 이때 알루미늄의 이상 입성장(abnormal grain growth)을 방지하여 비교적 균일한 입도분포를 지닌 소결체를 제조하기 위하여, 0.5 wt.%의 MgO가 doping된 일본 Sumitomo사의 AES11 및 AKP50 분말을 사용하였다.

제조 시편의 소결밀도를 수침법으로 측정하였으며, 주사전자현미경을 이용하여 연마면과 파괴면의 미세구조를 관찰하였다. 그리고 image analyzer를 사용하여 입경분포 및 평균입경을 조사하였다.

저속변형을 상태하에서의 기계적 성질로 4점 곡강도(inner span : 10 mm, outer span : 30 mm, cross head speed : 0.5 mm/min)법으로 파괴강도와 파괴인성을 측정하였다. 파괴강도 측정 시편의 크기는 4×3×40(mm³)이었으며, 파괴인성 측정 시편의 크기는 3×4×40(mm³)이었다. 이때 파괴인성 측정 시편으로는 notch 데 시편 높이의 비(a/W)가 0.5가 되도록, 폭 100 μm의 notch를 낸 SENB(single edge notched beam) 시편을 사용하였다.

경도는 인가하중 200g의 조건하에서의 Vickers 경도를 구하였다. 초음파를 이용, pulse-echo 방법으로 시편내의 음속을 측정하였다. 이때 종파속도의 측정에는 5 MHz, 횡파속도의 측정에는 2 MHz의 transducer를 사용하였

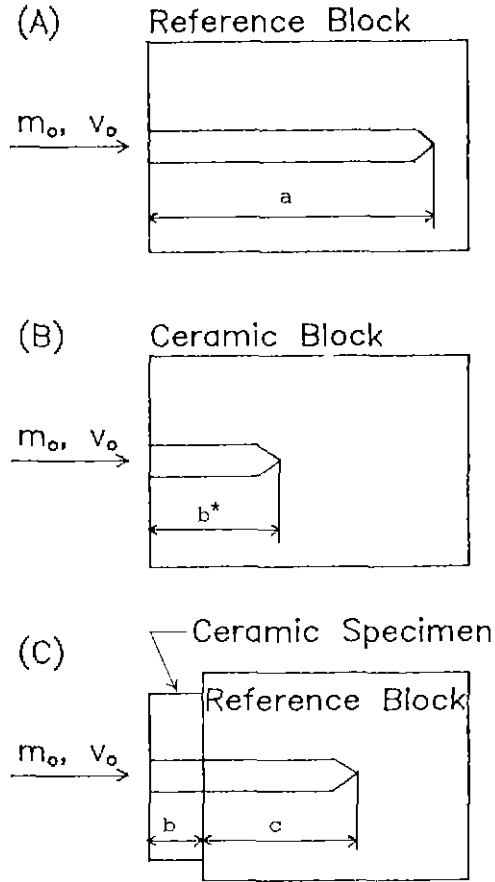


Fig. 1. Schematic representation of the thick backing test configuration.

으며, 측정 결과로부터 영률(Young's modulus) 등의 탄성계수를 구하였다.

2.2. 방탄능 측정

입경차가 큰 두 종류 알루미늄 시편의 방탄효율을 측정, 방탄능을 비교하였다. 방탄효율 측정에는 Rozenberg¹⁰⁾ 등이 제안한 thick backing법을 사용하였다. 관통자로는 Cal. 50 AP탄을 사용하였으며, 기준표적(reference block)으로는 A16061-T6 블록을 사용하였다. 이때 실제 탄자의 충돌속도는 857±11 m/sec이었다.

방탄효율이란 일정속도의 탄자가 표적관통시, 두 표적의 단위 면적당의 관통저항일의 비를 말한다. 이때의 실험 과정은 다음과 같다. 먼저 Fig.1(A)에서 보듯이 질량 m_0 인 탄자가 v_0 속도로 기준표적에 충돌하였을 때의 관통깊이, a 를 측정한다. 그 다음은 Fig.1(B)와 같이 실제로 방탄효율을 구하고자 하는 용융체 시편의 관통

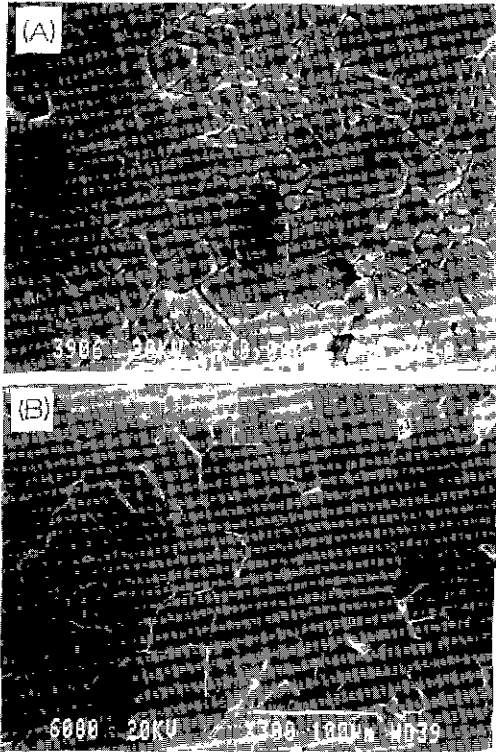


Fig. 2. Scanning electron micrographs of polished and etched surface of SG(A) and LG(B) specimen.

깊이, b^* 를 측정한다. 그러면 요입체 시편의 방탄효율, ϵ 은 다음 식 (1)로 주어진다 이때 ρ 는 밀도를 첨자 r 과 c 는 기준표적 및 요입체 시편을 의미한다.

$$\epsilon = \rho_r \cdot a / \rho_c \cdot b^* \quad (1)$$

그러나 요입체 표적은 완전히 깨어지기 때문에 b^* 측정이 매우 어려울 뿐만 아니라, 균일한 미세구조를 가지는 두꺼운 판재 제작 역시 어렵다. 따라서 Fig. 1(C)와 같이 일정 두께(b)의 요입체 시편을 관통한 후 기

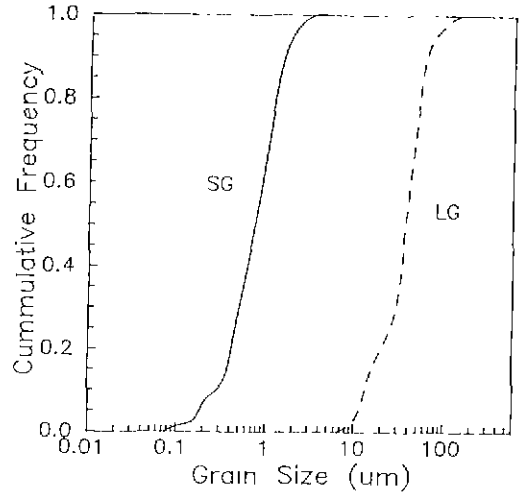


Fig. 3. Grain size distributions of alumina specimens.

준표적을 관통한, 잔류 관통깊이, c 를 측정하여 다음 식 (2)로 효율이 계산된다. 그로부터 외삽법에 의하여 요입체의 임계 관통깊이, $b^*(c=0$ 인 조건)를 구할 수 있다.

$$\epsilon = \rho_r \cdot (a - c) / \rho_c \cdot b \quad (2)$$

3. 결과 및 고찰

3.1. 미세구조 및 기계적 성질

본 연구에서 사용한 알루미늄 시편, SG 및 LG 두 종류 시편의 미세구조를 Fig. 2에 나타내었다. 두 종류 시편의 소결밀도는 각각 상대밀도 99% 이상이었으며, 평균 입경은 SG 시편은 1.15 μm , LG시편은 51.31 μm 으로써 약 45배 정도의 입경차이를 나타내고 있으며, 비교적 균일한 입경 분포를 보이고 있음을 확인할 수 있다(Fig. 3).

이 시편들의 통상의 저속 변형을 조건하에서 기계적 성질을 Table 1에 나타내었다. SG 시편의 파괴강도는 349 MPa로써 여타의 알루미늄 요입체와 비슷한 수치를

Table 1. Sintered Density and Mechanical Properties at Low Strain Rate of Alumina Specimens

	SG	LG	Remarks
Density			
(g/cm ³)	3.96	3.97	
(% of TD)	99.4	99.9	
Grain Size (μm)	1.15 \pm 0.79	51.31 \pm 29.90	LG/SG=45
Flexural Strength (MPa)	349 \pm 80	131 \pm 24	Low Strain Rate
Fracture Toughness (MPa $\sqrt{\text{m}}$)	4.23 \pm 0.90	3.01 \pm 0.52	Low Strain Rate
Vickers Hardness (GPa)	20.98 \pm 2.16	21.68 \pm 1.92	at 200g load



Fig. 4. Scanning electron micrographs of the fracture surface of SG(A) and LG(B) specimen.

보이고 있으나, LG 시편의 파괴강도는 131 MPa로, SG 시편의 38% 수준이었다. 그 이유는 Hall-Petch식($\sigma_f = \sigma_0 + K G^{-1/2}$, σ_f : 파괴강도, K: 상수, G: 입경)으로 표현되는 입경증가에 의한 파괴강도의 감소현상으로 이해할 수 있다.

파괴인성 역시 LG 시편이 $3.01 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 으로 SG 시편의 $4.23 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 에 비하여 71% 정도의 낮은 값을 나타내었다. SG 시편의 파괴인성은 통상의 알루미늄 시편에 비하여 다소 높은 값을 보이고 있는데, 이는 본 시편이 가압소결로 제조되었기 때문인 것으로 생각된다. 이들 두 시편이 서로 다른 파괴인성값을 보이는 것은 저속 변형을 조건하에서 파괴양상(fracture mode)에 차이가 있기 때문인 것으로 여겨지는데, 다음의 Fig. 4의 파면 사진에서 확인할 수 있는 바와 같이, SG 시편의 파괴는 주로 입계를 따라 진행되었으나(intergranular fracture), LG 시편에서는 주로 입내 파괴(transgranular fracture)가 발생하였다. 이와같이 일단 입내파괴가 일어나게 되면, 파괴시 새모이 생성되는 표면(fracture surface)이 감소하기 때문에, 파괴에너지(work of fracture)

Table 2. Sonic Velocities and Elastic Properties of Alumina Specimens

	SG	LG
Sonic Velocity (m/s)		
Longitudinal (C_L)	10830± 64	10995± 19
Shear (C_s)	6444± 136	6358± 122
Bulk (C_B)	7867± 155	8190± 145
Elastic Modulus (GPa)		
Young's (E)	403± 19	400± 11
Shear (G)	164± 12	160± 6
Bulk (B)	245± 9	267± 9
Acoustic Impedance (MPa·s/m)		
Longitudinal ($\rho \cdot C_L$)	42.8	43.7
Shear ($\rho \cdot C_s$)	25.5	25.2
Bulk ($\rho \cdot C_B$)	31.1	32.3
Poisson's Ratio	0.225± 0.018	0.249± 0.015
Adiabatic Compressibility (1/B) (GPa^{-1})	4.08×10^{-3}	3.75×10^{-3}

의 감소에 따른 파괴인성의 감소가 수반되기 때문이다. 한편 경도값은 SG 시편(20.98 GPa)에 비하여 LG 시편(21.68 GPa)이 3.3% 우수하였다.

3.2. 음속과 탄성률

시편내의 음속을 초음파를 사용하여 측정하였으며, 이로부터 탄성률과 음향 임피던스(acoustic impedance)를 계산, 그 결과를 Table 2에 나타내었다. 두 시편의 종파속도의 횡파속도의 차이는 1.5% 이내로 유사하였으며, 체적파 속도(bulk velocity)는 약 4%의 차이를 나타내었다.

영률(Young's modulus)과 전단 탄성계수(shear modulus)의 차이는 2% 이내이었으나, 체적 탄성계수(bulk modulus)는 약 9%의 차이를 나타내었으며, 단열 압축률(adiabatic compressibility) 역시 약 9%의 차이를 나타내었다 음향 임피던스 역시 bulk impedance가 4%로 가장 큰 차이를 나타내었다

두 시편 사이의 음속 및 탄성률의 차이는 탄자와 요업체 표적의 충돌시 충격파의 발생 및 전파속도 등에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다¹¹⁾. 즉 두 물질이 고속으로 충돌하게 되면 두 물질내에 충격파가 발생하게 되는데, 이때 충격파가 지나는 압축응력의 크기 및 재료내의 전파속도는 당시의 밀도, 체적파 속도 및 입자

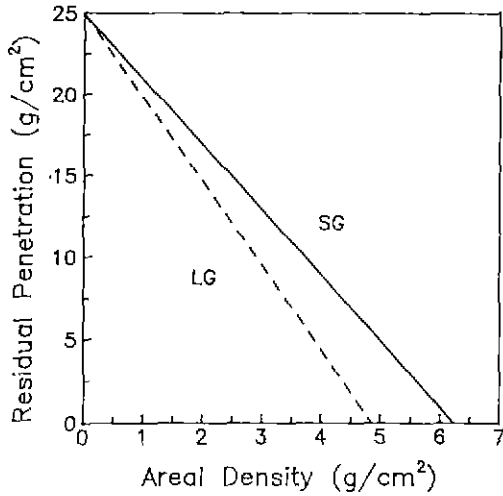


Fig. 5. Areal density of residual penetration as a function of areal density of alumina specimens. The areal density of residual penetration was normalized by using a condition of a projectile velocity of 860 m/s.

속도(particle velocity) 등에 의존한다. 충돌초기에 일어나는 것으로 알려진 충격파에 의한 탄자의 약화, 탄자의 직접 변형, 요업체 표적의 대탄자 저항능은 이러한 충격파의 크기 및 속도 등에 의하여 결정된다. 따라서 이러한 차이는 요업체의 방탄성능, 특히 충돌 초기에 일어나는 방탄성능에 영향을 미칠 것으로 기대된다.

3.3. 방탄능

Caliber 50 AP탄자에 대한 방탄능을, A16061-T6 후면판을 사용하여 측정하였다. 알루미늄 시편의 면밀도 변화에 따른 잔류 관통깊이를 측정하였으며, 그 결과를 Fig. 5에 도시하였다. 이때 잔류 관통깊이는 탄속, 860 m/s의 조건으로 표준화(normalizing)한 값이다. 또한 그로부터 탄자를 완전히 방어할 수 있는 임계 두께 및 A16061-T6 대비 방탄효율을 구하여 Table 3에 나타내었다.

SG 시편의 A16061-T6 대비 방탄효율은 4.00이었으나, LG 시편은 5.13으로 28% 이상 우수하였다. Cal. 50 AP탄자가 860 m/s의 속도로 알루미늄 시편에 충돌할 때, 이 탄자를 완전히 방어할 수 있는 알루미늄 시편의 임계두께는 SG 시편의 경우 15.75 mm이었으나, LG 시편의 경우는 급격히 감소하여 12.21 mm이었다. 이는 임적이 큰 LG 시편의 Cal. 50 AP탄자에 대한 방탄성능이 우수하여, SG 시편의 78% 정도의 두께만 있어도 이 탄자를

Table 3. Ballistic Performance of Alumina Specimens

	SG	LG
Ballistic Efficiency	3.9988	5.1333
Normalized Critical Thickness (mm)	15.75	12.21
Areal Density Ratio	1.00	0.78

완전히 방어할 수 있음을 의미한다.

일반적으로 요업체 표적이 고속으로 비행하는 탄자를 저지시키기 위해서는, 다음과 같은 여러가지 탄자에너지 흡수기구가 작용해야 하는 것으로 알려져 있다⁶⁾.

1) 요업체 표적은 고속 비행 탄자와 충돌 순간, 탄자 내에 매우 큰 충격파를 발생시킴으로써 탄자의 약화를 초래할 수 있어야 한다.

2) 요업체 표적은 고속 비행 탄자와의 직접 초기 접촉 단계에서 head의 형상을 변형 및 소실시켜, 탄자의 가압력을 단시간내에 효과적으로 감소시킬 수 있어야 한다.

3) 요업체 표적은 무수한 균열을 발생시켜 탄자의 에너지를 흡수할 수 있어야 한다. 이때 요업체 표적은 전통적으로 원추형 파괴(cone fracture)를 형성하며, 이것에 의해 후면판에 전달되는 탄자의 가압력도 효율적으로 감소되는 효과가 수반된다.

4) 파쇄된 요업체 파편들의 일부가 탄자의 비행 반대방향으로 상당한 속도를 가진채 분출됨으로써 탄자의 에너지를 흡수할 수 있어야 한다.

5) 그리고 미분출 잔류 파쇄입자들은 탄자의 전진을 방해하는 압축저항체로 작용할 수 있으며, 파쇄 입자들 간의 마찰에 의한 마찰열 등으로 탄자에너지를 흡수할 수 있어야 한다.

Wilkins 등의³⁻⁵⁾ 보고에 의하면, 충격파 발생에 의한 탄자의 약화 및 고속비행탄자의 직접 변형과 같은 흡수기구는 비교적 충돌초기에, 그리고 요업체 표적의 파쇄 및 파쇄 입자의 분출 그리고 압축저항과 같은 흡수기구는 비교적 충돌후기에 주로 작용하는 것으로 생각할 수 있다.

위에서 언급한 흡수기구 가운데 어떠한 기구가 효과적으로 작용하여, LG 표적의 방탄효율이 SG 표적에 비하여 우수한 것으로 나타나는 것인지 정확히 이해할 수는 없다. 그러나 방탄 시험 후에 회수한 탄자의 형상 관찰로부터 LG 표적이 SG 표적에 비하여 훨씬 효과적으로 탄자 head의 형상을 변형시킨 것을 관찰할 수 있다. 기준 표적인 A16061-T6만 관통한 탄자의 형상과, 면밀도 3.0 g/cm²인 SG 및 LG 시편을 관통한 후 다시 기준

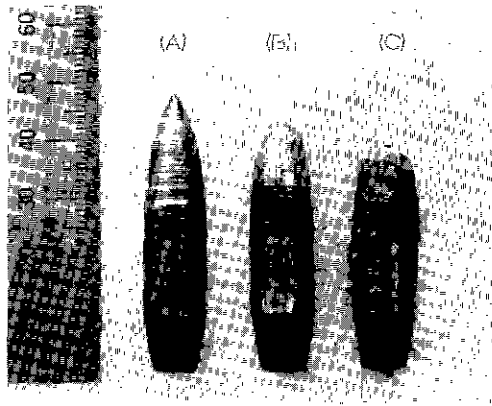


Fig. 6. Projectile core (Cal. 50 AP bullet) shape after impacting reference block only(A), SG(B), and LG(C) alumina specimen with back-up of reference block at a projectile velocity of 860 m/s.

표적을 관통한 후 회수된 탄자의 형태를 Fig. 6에 나타내었다. 기준 표적만 관통한 탄자(Fig. 6(A))에 비하여 LG 표적을 관통한 탄자(Fig. 6(C))의 소실량은 11.8 wt. %인 반면에, SG 표적을 관통한 탄자(Fig. 6(B))의 소실량은 4.7 wt. %로써, LG 표적은 SG 표적에 비하여 2배 이상의 탄자 head를 소실시켜 버렸음을 알 수 있다. 이는 충돌초기에 주로 작용하는 것으로 알려진 충격파에 의한 탄자의 약화 및 탄자의 직접 파손 구간에서, LG 표적이 SG 표적에 비해 훨씬 더 우수함을 시사해주는 것이다. 더욱이 Louro 등은⁹⁾ 동일 상태 및 크기의 응력을 지니는 충격파를 알루미늄 시편내에 발생, 통과시켰을 경우, 입경이 작은 시편(4 μm)에 비하여 입경이 큰 시편(24 μm)에서 거시적 파괴빈도가 훨씬 작았다고 보고하였다. 이와같이 거시적 파괴가 적게 일어나면, 탄자 관통에 대한 요업체 시편의 저항이 더 클 것은 당연한 사실이며, 따라서 탄자 head의 소실량이 증가하였을 것으로 생각된다.

그러나 이 구간은 탄자의 비행속도가 크고, 탄자의 요업체 표적에 대한 순간 가압력이 요업체의 동적 항복강도(σ_{HEL})을 능가하는 영역으로 지금까지의 연구결과만으로는 요업체의 파괴 거동을 전혀 예측할 수 없는 특수한 영역으로 간주되고 있다. 요업체의 강도, 인성 등과 같은 저속 변형을 구간에서 측정된 제 물성의 경향과, 고속 변형을 구간의 특성인 방탄물성의 경향과는 전혀 일치되는 바가 발견되지 않는 것으로 보고되고 있다^{6,7)}. 오히려 이 영역은 충격파의 영향 구간으로, 재료의 원자구조와 같은 본질적 극미세구조가 큰 영향을 미치는 영역이 아닌가 추정되고 있을 뿐이다.

본 연구결과에 대하여도, 이를 이해하는데 직접적으

로 도움이 될만한 이론이나 가설은 아직 정립되어 있지 않다. 그러나 입계는 내부와는 상이한 원자배열을 갖고 있기 때문에, 충격파의 전파시 입계가 입내에 비하여 충격파에 대한 저항능이 작으며, 그리고 충격파에 대한 저항능이 입계로 둘러싸인 입자의 크기에 의하여 결정되는 것으로 가정한다면, 한개 입자의 평균 체적이 90,000배만큼 큰 LG 표적이 SG 표적에 비하여 더 큰 충격파 저항능을 나타내었을 것으로 추측할 수 있을 것이다. 또한 후형판재로 구성된 요업체 표적이 박형판재 여러장으로 구성된 요업체 표적보다 방탄성능이 우수하다는 Wilkins 등의 연구결과로부터도 위의 결과를 추측할 수 있다⁸⁾.

상기 사실이 충격초기에 일어나면, 요업체 표적이 역으로 탄자에 가하는 초기 가압력도 LG 표적의 경우가 더 클 것이므로, 이것에 의해 탄자의 소실량도 증가하게 된 것이라고 생각할 수 있다. 또 동일한 두께의 요업체 표적에서는 LG 표적이 SG 표적보다 더 큰 원추형 파괴를 생성시킬 것이므로 후면판에 전달되는 가압력도 상대적으로 작아지게 될 것이다. 전술한 이러한 현상들이 복합적으로 작용함으로써 LG 표적이 SG 표적에 비해 28% 이상 우수한 방탄효율을 나타낸 것으로 생각된다.

4. 결 론

소결밀도가 99% 이상이며 평균입경이 각각 1 μm 및 51 μm 인 알루미늄 시편을 제조하여, 저속 변형을 조건에서의 제반 기계적 특성과 고속 변형을 조건하에서의 특성인 방탄능을 측정하였다. 저속 변형을 조건하에서의 기계적 특성은 입경이 작은 시편이 우수하였으나, 고속 변형을 조건하에서의 특성인 방탄효율은 입경이 큰 시편이 오히려 우수하였다. 이러한 이유는 아직 정확히 이해되고 있지는 않으나, 총 입계면적의 감소, 충격파에 대한 저항 Unit의 크기, 체적파 속도의 차이에 따른 초기 발생 충격파의 크기 차이 및 정도값 등의 변화가 복합적으로 작용하여, 충돌초기에 탄자의 운동에너지를 효과적으로 감소시켰기 때문인 것으로 생각된다.

REFERENCES

1. R.C. Laible, *Ballistic Materials and Penetration Mechanics*, Elsevier Sci. Pub. Co., Amsterdam (1980).
2. D.J. Viechnicki, M.J. Slavin, and M.I. Kliman, "Development and Current Status and Armor Ceramics," *Ceram Bull.*, 70(6), 1035-1039 (1991)
3. M.L. Wilkins, "Third Progress Report of Light Armor

- Program," Tech. Report, UCRL-50460, Lawrence Radiation Laboratory, Livermore, CA (1968).
4. M.L. Wilkins, C.F. Clune, and C.A. Honodel, "Fourth Progress Report of Light Armor Program," Tech. Report, UCRL-50694, Lawrence Radiation Laboratory, Livermore, CA (1969).
 5. M.L. Wilkins, R.L. Landingham, and C.A. Honodel, "Fifth Progress Report of Light Armor Program," Tech. Report, UCRL-50980, Lawrence Radiation Laboratory, Livermore, CA (1971).
 6. R.L. Woodward, "A Simple One-Dimensional Approach to Modelling Ceramic Composite Armour Defeat," *Int. J. Impact Eng.*, **9**(4), 455-474 (1990)
 7. D.L. Woodward, R.G. O'Donnell, B.J. Baxter, B. Nicol, and S.D. Pattie, "Energy Absorption in the Failure of Ceramic Composite Armours," *Materials Forum*, **13**, 174-181 (1989).
 8. J. Cagnoux, "Spherical Waves in Pure Alumina. Effects of Grain Size on Flow and Fracture," pp. 445-448, in *Shock Compression of Condensed Matter*, ed. S.C. Schmidt, J.N. Johnson, and L. W. Davison, Elsevier Sci. Pub. Co., B.V. (1990).
 9. L.H.L. Louro and M.A. Meyers, "Effect of Stress State and Microstructural Parameters on Impact Damage of Alumina-Based Ceramics," *J. Mater. Sci.*, **24**, 2516-2532 (1989).
 10. Z. Rozenberg and Y. Yeshurun, "The Relation between Ballistic Efficiency and Compressive Strength of Ceramic Tile," *Int. J. Impact Eng.*, **7**(3), 357-362 (1988).
 11. M.A. Meyers and G. Ravichandran, *Lectures on Dynamic Behavior of Materials*, University of California, San Diego, CA (1989).