

## 알루미나의 시편크기가 방탄거동에 미치는 영향

송휴섭 · S. J. Bless\* · 장성도

한국과학기술연구원 세라믹 공정 센터

\*IAT, U. of Texas

(1994년 9월 24일 접수)

### Tile Size Dependency of Ballistic Performance in Alumina

Huesup Song, S. J. Bless\* and Sung-Do Jang

Ceramic Processing Center, KIST

\*IAT, U. of Texas

(Received September 24, 1994)

#### 요 약

크기, 형상 및 표적의 형상이 서로 다른 알루미나 타일의 탄도효율을 thick backing plate 방법으로 측정하였다. 두께가 약 8 mm이고 정사각형 알루미나 타일에 대해 총격체로 직경 12.7 mm인 탄알을 사용한 경우, 알루미나의 탄도효율은 한번의 길이가 약 100 mm까지는 타일의 크기에 따라 급격히 증가하다가 그 이상의 크기에서는 포화되는 경향을 보였다. 동일한 크기 및 두께의 타일에서 원형타일은 정사각형타일에 비해 낮은 탄도효율을 보였다. 타일의 크기가 50 mm로 작을 경우 타일이 후면판의 홈에 위치한 표적은 후면판의 표면에 위치하는 표적에 비해 상당히 높은 탄도효율을 가졌다. 그러나 표적형상에 따른 탄도효율의 차이는 큰 타일의 경우에는 적었다. 이러한 결과들은 탄알의 관통중 타일의 변에서 발생하는 반사파의 영향으로 발생한 균열로 설명할 수 있었다.

#### ABSTRACT

The ballistic efficiency of alumina tiles with various sizes, shapes, and target configurations was measured by the thick backing plate technique. The ballistic efficiency of square tiles roughly 8 mm thick struck by 12.7 mm diameter bullets rapidly increased with tile size up to about 100 mm, then tended to saturate. Circular shape tiles had lower ballistic efficiencies than those of square shape tiles for the same width and thickness. Small tiles (50 mm) that were recessed in aluminum wells had a significantly higher ballistic efficiency than tiles placed on a flat surface. However, the difference in the ballistic efficiency between the two target configurations became small at larger tile sizes. All the results could be explained by the effect of reflected waves at edges and the propagation of resulting cracks on the penetration process.

**Key words:** Ballistic efficiency, Alumina, Tile size, Thick backing plate technique, Reflected wave

#### 1. 서 론

세라믹 방탄판의 개발에 관한 기존의 연구들은 대부분 세라믹의 특성이 관통저항(penetration resistance)에 미치는 영향을 중점적으로 조사하였다. 그러나 세라믹 방탄판의 설계변수(design parameter)도 방탄판의 성능에 큰 영향을 미칠 수 있다. 실제로 타일의 크기나 형상 등 설계변수의 중요성은 그 동안 인식되어 왔으며, 방탄판의 설계에 암시적으로 적용되기도 하였다. 예를 들

어 경량방탄판(light weight armor)의 성능시험시 세라믹 타일은 총격체의 직경과 비슷한 두께를 가지며 타일 한번의 길이는 두께의 약 10배 정도를 가지는 것이 사용된 경우가 있다<sup>1)</sup>. 이러한 중요성에도 불구하고 설계 변수에 대한 실험결과들은 방탄판의 설계에 직접적으로 응용되기 때문에 문헌상에는 매우 제한적으로 발표되고 있다.

본 실험의 주목적은 타일크기가 알루미나의 방탄거동(ballistic performance)에 미치는 영향을 조사하는 것이

다. 알루미늄은 세라믹 재료중 방탄판으로 가장 많이 연구되었으며 또한 실제로 세라믹 방탄판의 주된 재료로 사용되고 있기 때문에 대상재료로 선택하였다. 따라서 알루미늄의 정적 특성 뿐만 아니라 동적 특성도 비교적 잘 알려져 있다<sup>2)</sup>.

알루미늄의 방탄거동은 thick backing plate 방법<sup>3)</sup>에 의해 조사하였다. 세라믹의 관통저항을 조사하기 위해 가장 많이 사용되고 있는 방법은 탄도한계(ballistic limit) 시험이나, 많은 수의 시편이 요구되어 실험에 장시간이 소요되고 실험비용이 과다한 단점이 있다. Thick backing plate 방법은 탄도한계 시험을 대체하기 위하여 제안되었으며, 이 방법의 효용성은 경량방탄판<sup>2)</sup> 및 중량방탄판<sup>4)</sup>의 실험을 통하여 입증되었다.

Thick backing plate 방법에서 사용되는 표적(target)은 두꺼운 후면판(일반적으로 알루미늄)에 세라믹 타일이 접착되어 있는 형상을 가진다. 타일의 탄도효율(ballistic efficiency)  $e$ 는 충격 후 후면판의 관통깊이로부터 다음 식에 의해 계산된다.

$$e = \frac{W_{ref} - W_r}{W_c} \quad (1)$$

여기서  $W_{ref}$  및  $W_r$ 은 후면판인 알루미늄의 관통 면적밀도(areal density)로서 각각 세라믹 타일이 없는 경우 및 세라믹 타일이 있는 경우에 해당하며,  $W_c$ 는 세라믹 타일의 면적밀도를 나타낸다. 이 방법의 기본적인 가정은  $W_{ref} - W_r$ 의 값이  $W_c$ 에 직선적으로 비례한다는 것이다. 이 가정은 알루미늄<sup>3,5)</sup>를 포함한 세라믹 재료에서 실험적으로 증명되었다<sup>1)</sup>.

그러나 탄알이 얇은 세라믹 타일을 관통할 경우 thick backing plate 방법에 의해 측정된  $e$ 가 일정한 값을 가지지 않는 경우가 보고되기도 하였다<sup>6)</sup>. 이러한 결과는 관통깊이에 따른 관통양상의 차이에 기인한 것으로 생각된다. 두꺼운 후면판을 사용한 semi-infinite 관통에서는 전단력만이 작용하나, 탄도한계 시험에서와 같이 후면판이 얇은 경우에는 전단력 외에도 bending과 stretching을 포함하는 후면판의 변형이 포함된다. 즉 thick backing plate 방법에서도 후면판으로의 관통깊이가 적은 경우에는 세라믹 타일은 탄도한계 테스터에서와 같은 관통양상을 가질 수 있다. 실제로 Haney 등<sup>6)</sup>의 실험결과에서도  $e$  값의 변화는 주로 관통깊이가 적은 경우에 국한되어 관찰된 것을 알 수 있다. 따라서 thick backing plate 방법이 적용될 수 있는 관통 면적밀도에는 어느 정도 제한이 있으나, 이 방법이 세라믹 방탄판의 방탄 거동, 특히 여러가지 변수의 영향을 조사하는 용도로는

Table 1. Physical Properties of Specimen

Properties	Sintered	Hot-pressed
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Density (g/cm <sup>3</sup> )	3.92	3.96
Hardness (GPa)	16.4	16.1
Flex. Strength (MPa)	278	290
Comp. Strength (GPa)	4.7	
Toughness (MPam <sup>1/2</sup> )	3.0	3.6
Long. Wave Vel. (km/s)	10.82	10.80
Shear Wave Vel. (km/s)	6.37	
Poisson's Ratio	0.24	
Youngs Modulus (GPa)	393	419
Shear Modulus (GPa)	159	
Bulk Modulus (GPa)	247	
HEL (GPa)	11.6	11.9

유용한 방법으로 판단된다.

## 2. 실험방법

### 2.1. 재료

정사각형 형상의 시편으로는 상압소결된 알루미늄을 사용하였다. 시편의 크기는 50 mm에서 108 mm까지 변화시켰으며 타일의 두께는 약 8 mm이었다. 타일형상의 영향을 보기 위한 원형 형상의 타일은 열간가압에 의해 제조되었다(일반적으로 열간가압에 의해 제조된 타일은 상압소결된 타일에 비해 높은 탄도효율을 가진다). 원형타일의 직경은 76 mm이었다.

모든 알루미늄 시편은 >99.99%의 고순도 알루미늄 분말(AKP 30, Sumitomo사)을 출발 원료로 사용하였으며, 0.05 wt%의 MgO를 소결조제로 첨가하였다. 열간가압에 의해 제조된 알루미늄 시편의 미세구조는 2~3 μm의 등방형 결정입자로 이루어져 있었다. 소결에 의해 제조된 나머지 모든 알루미늄 시편은 10 μm 정도의 등방형 결정입자로 이루어진 미세구조를 보였다. 알루미늄 시편의 제조방법과 특성은 이미 다른 곳<sup>7)</sup>에 보고되었으며, 본 실험과 관계되는 일부 특성은 Table 1에 나타내었다.

### 2.2. Thick backing plate 방법

Thick backing plate 실험에서는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 (a) flat 형 및 (b) well 형 두가지 종류의 표적을 사용하였다. 후면판은 약 150 mm의 두께를 가지는 6061

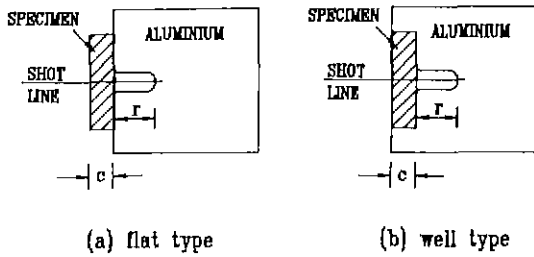


Fig. 1. Target configurations used in the thick backing plate technique: (a) flat and (b) well types.

T-651 알루미늄을 사용하였다. 시편은 flat 형의 표적에서는 표면가공된 알루미늄 표면 위에, well 형에서는 시편모양으로 가공된 휴안에 Epoxy(Devcon Co.)를 사용하여 접착하였다. Well 형의 홈은 시편과 거의 일치하는 크기로 가공하였으며, 충격시 시편의 팽창이 발생하게 되면 후면판에 의한 구속력(confinement)이 작용하게 된다.

충격체로 사용된 탄알은 .50 Cal APM2(직경 12.7 mm)로 University of Dayton Research Institute에 있는 rifled barrel(1 twist/18 inches)을 사용하여 발사하였다. 충격 후 관통깊이는 profile gauge 또는 X-ray radiography를 사용하여 측정하였다. 탄도효율은 측정된 관통깊이로부터 식 (1)을 이용하여 계산하였다. 알루미늄 후면판의 관통깊이(식 (1)에서  $W_{ref}$ )는 81.9 mm의 평균값을 가지고

있었다. Thick backing plate 실험의 조건 및 결과는 Table 2에 정리하였다.

### 3. 실험 결과

Fig. 2는 Table 2에 계산된 탄도효율을 타일크기의 함수로 나타낸 것이다. Flat 형 및 well 형 표적 두 경우 모두 탄도효율이 타일 크기에 따라 급격히 증가하다가 타일크기가 약 100 mm에 도달하게 되면 탄도효율이 포화되는 경향을 보이고 있다. 특히 well 형의 표적에서는 탄도효율의 값이 포화되어 가는 과정을 충격 후 후면판의 변형으로도 확인할 수 있었다. 50 mm 타일의 경우 충격 후 후면판에서 시편의 변과 인접하였던 부분이 크게 솟아오른 것을 관찰하였다. 그러나 이러한 변형은 83 mm 타일에서 감소하였으며, 타일 크기가 96 mm 이상이 되면 관찰되지 않았다.

타일 크기가 83 mm 이상인 경우에는 well 형이 flat 형 표적의 시편에 비해 항상 약간 높은 탄도효율을 가지는 하나 두 표적간의 차이는 크기 않았다. 그러나 본 실험에서 사용한 시편중 가장 작은 크기인 50 mm 타일에서는 flat 형이 well 형 표적의 시편에 비해 훨씬 낮은 탄도효율을 가짐을 알 수 있다.

Fig. 2는 또한 동일한 표적(well 형)을 사용한 경우 원형타일의 탄도효율이 정사각형 타일의 탄도효율보다 낮은 값을 가지는 것을 보여준다.

Table 2. Summary of Experimental Conditions and Results.

Shot No.	Size (mm)	$W_c$ (g/cm <sup>2</sup> )	Target Conf.	Projectile Vel. (m/s)	Pent. (mm)	e
4070	50×50	3.14	well	851	15.1	5.76
4072	50×50	3.16	well	849	17.0	5.58
4702	50×50	3.12	flat	852	34.8	4.06
4071	67×67	3.11	well	850	15.3	5.82
4073	67×67	3.11	well	855	13.0	6.00
4075	83×83	3.14	well	854	13.5	5.90
4689	83×83	3.10	well	856	9.6	6.28
4079	83×83	3.12	flat	852	15.0	5.81
4074	96×96	3.12	well	854	11.0	6.16
4076	96×96	3.10	well	853	11.1	6.21
4080	96×96	3.14	flat	852	15.1	5.76
4690	108×108	3.12	well	856	8.0	6.37
4691	107×107	2.94	well	864	14.3	6.19
4701	108×108	3.09	flat	855	12.5	6.06
4077	76(dia.)*	3.19	well	851	16.9	5.54

\*Hot-pressed specimen

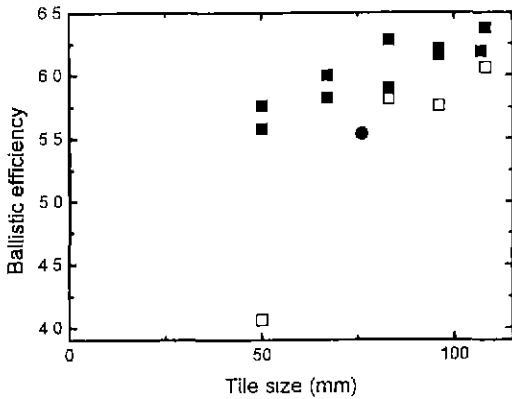


Fig. 2. Ballistic efficiencies of alumina tiles with various size, shape, and target configuration: squares and circles represent square and round shape tiles, respectively, and open and filled symbols represent flat and well type backing configurations, respectively.

#### 4. 고 찰

탄도효율이 타일크기의 함수인 것으로부터 타일의 변의 존재에 기인하여 관통에 영향을 주는 기구가 존재함을 알 수 있다. 이러한 기구로서 우선 충격시 타일의 휨(bending)에 의해 충격에너지의 일부를 흡수하는 기구를 생각할 수 있다. 충격시 타일의 휨은 타일크기에 따라 증가하기 때문에 탄도효율이 타일크기에 따라 증가하는 현상을 설명할 수 있다. 그러나 이 기구가 맞다면 실험결과와는 반대로 충격시보다 쉽게 휘어질 수 있는 flat 형이 well 형 표적의 타일보다 높은 탄도효율을 가져야 할 것이다.

다른 가능성으로는 충격시 발생하는 압축파가 타일의 면에서 인장파로 반사되는 현상에 따른 결과로 볼 수 있다. 반사된 인장파가 충격지점(시편의 중앙)으로 돌아올 때 응력의 일부분이 인장력으로 작용하게 되어 세라믹 타일의 파괴가 발생할 수 있다. 파괴된 세라믹 타일이 파괴 전 타일에 비해, mean stress의 감소가 있는 경우 강도가 감소하게 되어<sup>8)</sup> 파괴된 타일에서는 보다 쉽게 관통이 발생한다. 이 기구는 타일크기의 영향 뿐만 아니라 타일형상의 영향도 설명할 수 있다. 그러나 타일의 면으로부터 파의 반사는 변이 후면판의 영향을 받지 않는 경우(flat 형)나 후면판에 의해 들러 썬인 경우(well 형)에 차이가 없으므로, 이 기구는 작은 크기의 타일에서 관찰된 후면판에 의한 구속력의 영향을 설명할 수 없다.

Fig. 2에 나타난 모든 결과들을 설명하기 위해서 본 논문에서는 반사파에 의해 충격지점에 방사(radial) 균열이 발생하며 방사균열은 파괴된 시편의 움직임과 관계가 있다는 가설을 제시한다. 방사균열에 의해 형성된 파이모양의 조각들이 바깥쪽으로 이동할 수 있다면 충격체의 관통을 쉽게 할 수 있다. 따라서 후면판의 구속력은 조각들의 이러한 이동을 제한하여 50 mm 타일에서 본 것과 같은 결과가 발생한다. 또한 원형타일이 정사각형타일에 비해 낮은 탄도효율을 가지는 것은 형상에 따른 반사파의 기하학적 응집효과로도 설명되지만, 원형타일에서 구속력에 의해 발생하는 높은 hoop 응력으로 인해 타일의 파괴과정이 촉진된 결과로도 해석될 수 있다.

이러한 가설은 관통과정에서 방사균열의 발생을 전제로 한다. 본 실험시에 충격과정을 고속카메라로 촬영한 결과<sup>9)</sup> 20  $\mu$ sec까지 방사균열이 관찰되지 않고 그 이후에는 충격에 의한 파편 때문에 표면관찰이 불가능하여 제안된 가설을 뒷받침하지 못하였다. 그러나 Florence와 Ahrens<sup>10)</sup>는 균열발생이 충격 후 21  $\mu$ sec 후에 시작되는 것을 관찰하였다. Wilkins<sup>11)</sup> 역시 충격체가 알루미나 타일 속으로의 관통이 충격 후 20  $\mu$ sec에서 시작되는 것을 관찰하였다. 또한 Florence와 Ahrens<sup>10)</sup> 및 Wilkins<sup>11)</sup>의 실험에서 충격초기에 각각 25 및 30  $\mu$ sec 동안 충격체의 속도가 변하지 않는 일정한 시간이 있음을 관찰하였다. 이 시간 동안 충격체의 속도는 감소하지 않으나 충격체의 길이는 충격체가 부서짐(shattering)으로 인해 줄어든다.

충격초기 충격체의 속도가 변하지 않는 기간은 충격체가 충격 후 관통시작까지의 시간인 duration of impact에 해당한다고 볼 수 있다. 한편 충격 후 타일이 균열에 의해 파괴되는 시간은 충격파가 타일의 변까지 왕복하여 균열이 충격지점에 발생하는 시간과 발생한 균열이 타일 내에서 전파되는 시간의 합으로 나타낼 수 있다. 균열의 전파속도로 비슷한 값을 가지는 표면파인 Rayleigh 파의 속도를 사용하면 충격 후 타일의 파괴까지의 시간은 본 실험의 조건에서 약 30  $\mu$ sec이다. 이와 같이 계산된 값을 Florence와 Ahrens<sup>10)</sup> 및 Wilkins<sup>11)</sup>의 실험에서 관찰된 duration of impact의 값과 비교하면 충격체의 관통은 타일이 파괴된 후에 발생하는 것으로 판단된다. 그러나 Fig. 2에서 관찰된 구속력의 효과는 타일에 균열이 발생하는 시점에서 나타나기 시작하여 duration of impact 기간동안 계속될 것이 예상된다. 또한 타일크기의 영향도 반사파가 충격지점에 도달하는, 즉 타일에 균열이 발생하는 시점에서 나타나기 시작할 것으로 생각된다.

## 5. 결 론

본 실험의 결과는 세라믹 방탄판의 탄도효율이 타일의 크기, 형상 및 표적형상의 함수임을 명확히 보여준다. 이러한 변수들의 영향은 충격파의 타일 변에서의 반사에 의한 균열의 발생 및 균열의 전파에 의해 설명될 수 있었다. 따라서 세라믹 방탄판의 방탄거동을 비교하기 위해서는 실험조건의 표준화가 필요하다.

## 감사의 글

본 연구는 과기처 특정과제(2N07130)로 수행되었으며, 이에 감사드립니다. 또한 관통 실험시 도움을 준 미국 UDRI의 T. Williams 씨에게도 감사를 드립니다.

## REFERENCES

1. See, for example, M.L. Wilkins, R.L. Landingham, and C.A. Honodel, "Fifth Progress Report Light Armor Program," UCRL-50980, 1971.
2. For dynamic properties of  $Al_2O_3$  see, for example, D. E. Munson and R.J. Lawrence, "Dynamic Deformation of Polycrystalline Alumina," *J. Appl. Phys.*, **50**, 6272 (1979).
3. Z. Rosenberg, S. Bless, Y. Yeshurun, and K. Okajima, 491-498 in *Impact Loading and Dynamic Behavior of*

- Materials*, ed. C.Y. Chiem, H.-D. Kunze, and L.W. Meyer, 1988.
4. Z. Rosenberg, S.J. Bless, Y. Yeshurun, and N.S. Brar, "On the Relation Between the Penetration Resistance of Ceramic Tiles and Their Dynamic Properties," to be published.
5. See, for example, C.E. Anderson Jr. and B.L. Morris, "The Ballistic Performance of Confined  $Al_2O_3$  Ceramic Tiles," *Int. J. Impact Engng.*, **12**, 167 (1992).
6. C.N. Haney, R.J. Hoffman, M.A. Adams, and J.G. Zwissler, Sixth TACOM Armor Coordinating Conference, Gaithersburg, MD, April 1990 (unpublished).
7. H. Song, S.J. Bless, N.S. Brar, C.H. Simha and S.D. Jang, 737-740 in *High-Pressure Science and Technology-1993*, ed. S.C. Schmidt, J.W. Shaner, G.A. Samara, and M. Ross, American Institute of Physics, 1994.
8. D. Yaziv, Y. Yeshurun, and S.J. Bless, "Shear Strength of Shock-Loaded Alumina as Determined with Longitudinal and Transverse Manganin Gauges," *J. Appl. Phys.*, **62**, 1120 (1987).
9. H. Song, "A Study on the Relationship between Microstructures and Dynamic Failure in Ceramics," MOST N644(1), 1990.
10. A.L. Florence and T.J. Ahrens, "Interaction of Projectile and Composite Armor," AMRA CR 67-05, 1967.
11. M.L. Wilkins, 633-638 in *Boron and Refractory Borides*, ed. V.I. Matkovich, 1977.