

방탄시험 후면변형 측정에 대한 불확도 추정

전병욱
국방기술품질원
e-mail:11756@dtaq.re.kr

Uncertainty estimation for BFS(Backface Signature) measurement of Ballistic resistance test

Byung-Wook Jun
DTaQ(Defense Agency for Technology and Quality)

요약

본 논문에서는 방탄시험 시 결과 판단 기준인 P-BFS 변형량을 측정할 때 발생하는 불확도에 대하여 산출하였다. 불확도 요인을 식별한 결과 A형으로는 반복측정 요인이 있었고, B형으로는 분해능과 교정결과가 있었다. 각 요인의 불확도를 산출하고 합성하여 불확도 최종표현인 확장불확도가 34.89 mm에서 0.02 mm의 불확도를 포함하고 있음을 알 수 있었다.

1. 서론

1.1 방탄시험 개요

방호성능 판단하는 기준 중 후면변형(P-BFS:Perforation BackFace Signature, 이하 P-BFS)의 측정 방법이 존재한다. P-BFS는 시편에 탄두가 탄착되었을 때, 충격 에너지가 시편 이면에 시편을 지지하고 있는 특정 매개체에 남은 탄착흔을 말한다. 같은 충격에너지를 받은 각 방탄 목적시편의 P-BFS에 대한 변형량은 시편의 방탄성능을 수치적으로 확인하는데 기준이 될 수 있다.

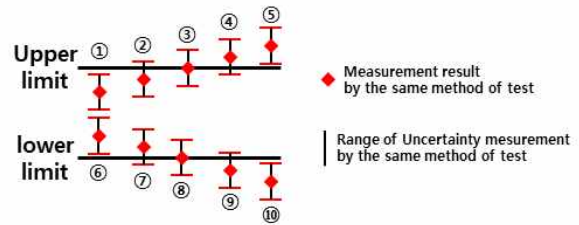
본 논문이 방탄시험 방법으로 인용하는 Ballistic Resistance of Body Armor(NIJ Standard-0101.06)에서는 P-BFS 변형량에 대한 기준을 < 44 mm 으로 규정하고 있다. P-BFS 변형량이 44 mm 이상인 방탄물자는 생존성 보장이 제한됨을 설명할 수 있다.

1.2 연구 배경

방탄시험 개요와 같이 P-BFS 변형량 기준 충족하는 방탄물자 생산을 위하여 많은 개발과 시험이 수행되고 있다. 그에 따라 P-BFS 변형량에 대한 정밀하고 정확하게 측정하는 것이 중요하다. 하지만 측정 과정에서는 필연적으로 오차를 포함할 수 밖에 없기 때문에 현존 기술의 측정으로는 참값을 아는 것이 불가능하다. 그러므로 모든 측정에는 측정 불확도(measurement uncertainty)가 존재한다.

이러한 불확실성은 아래 그림 1과 같은 상황을 야기할 수 있으며, 상황에 따라서 의사 결정에 큰 혼란을 줄 수 있으므로

측정에 대한 불확도 제시가 필요하다.



[그림 1] Conformity assessment case

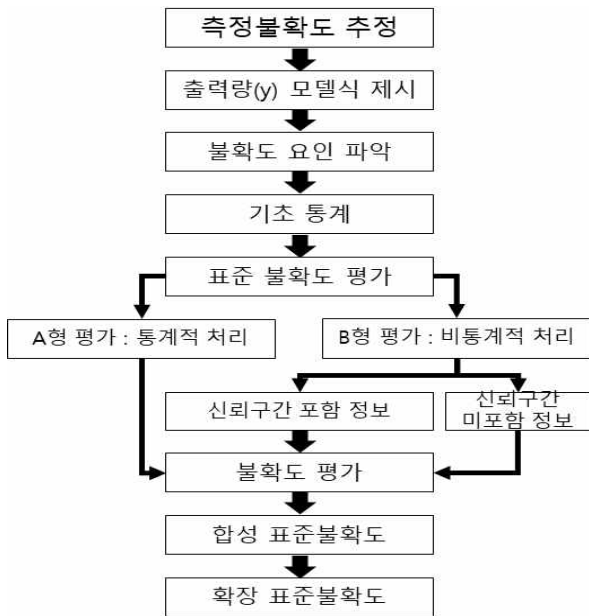
위 그림 1에서 보는 상황을 P-BFS 변형량 측정에 대입한다면 ①의 사례는 측정결과가 불확도 구간의 반을 상한선쪽으로 늘린다 하더라도 상한 아래에 있는 경우이므로, P-BFS 변형량은 유효하다고 결정할 수 있다. ②의 사례를 보면 측정결과가 불확도 구간의 반보다 작은 차이로 상한선 아래에 있다. 그러므로 P-BFS 변형량이 유효하다고 진술하는 것이 가능하지는 않다. 그러나 95%보다 작은 신뢰수준을 채택한다면, 유효하다는 진술은 가능할 것이다. ③의 사례는 측정결과가 상한선과 일치된 경우이다. 이때에는, 어떤 신뢰수준에서 적합 또는 부적합을 판단하는 것이 가능하지 않다. 그러나 신뢰수준과 관계없이 결론을 내려야만 할 때, 측정된 결과치가 상한선보다 작거나 같은(\leq)경우라면, 유효하다고 간주 할 수 있다. 하지만 측정된 결과값이 상한선보다 작은($<$)경우라면, 유효하지 않다고 판단할 수도 있다. ④의 사례는 측정결과가 불확도 구간의 반보다 작은 차이로 상한선 위에 있다. 그러므로 유효하지 않다고 판단하는 것은 불가하다. 그러나 95%보

다 작은 신뢰수준을 채택한다면, 부적합하다는 판단이 가능할 것이다. ⑤의 사례는 측정 결과가 확장불확도 구간의 반을 아래쪽으로 늘려도 규격의 상한 위에 있는 경우이다. 그러므로 P-BFS 변형량은 유효하지 않다고 판단할 수 있다.

⑥-⑩ 사례는 ①-⑤ 사례의 정확히 반대 사례이다. 이러한 사례를 비취볼 때, 합리적인 의사 결정을 위해서는 측정된 P-BFS 변형량이 내재한 불확도를 산출하고 인식하는 것이 중요함을 알 수 있다.

1.3 불확도 추정 방법

불확도는 우선 측정함에 있어 불확도에 기여하는 요인을 식별해야 한다. 요인은 반복측정의 우연효과에 의한 측정편차, 측정기기의 불확도 및 분해능, 측정자의 숙련도 차이, 기타 측정에 미치는 영향으로 파악할 수 있다. 그 후 각 요인을 A형 및 B형 불확도로 분류를 해야 한다. A형 불확도는 일련의 관측값을 통계적으로 분석하여 평가한 불확도이며, B형 불확도는 측정기기 교정성적 및 카탈로그에서 인용된 불확도를 신뢰수준에 따른 포함인자 k로 나눈 값이다. 각각의 A형 및 B형 평가를 통한 불확도를 구하고, 이들 표준불확도 성분들을 감도계수와 연계하여 합성표준불확도를 산출한 후 사용목적 및 신뢰수준에 따라 결정되는 포함인자 k를 합성 표준불확도에 곱하여 확장불확도를 추정한다. 이러한 불확도 추정 절차를 세부 흐름도로 표현한다면 다음 그림 2와 같이 나타낼 수 있다.



[그림 2] Flow chart about Uncertainty estimation of method

A형 표준불확도 u_A 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_A = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}} \quad (1)$$

여기 식(1)에서 n 는 반복 측정횟수, $s(x_i)$ 는 반복 측정값들

의 표준편차이며, $s(x_i)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$s(x_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2)$$

식(2)에서 x_i 는 측정값, \bar{x} 는 측정값의 평균이다.

B형 표준불확도 u_B 는 두 가지 경우로 분류할 수 있다. 첫 번째는 신뢰수준이 주어진 경우이다. 이 때, 불확도는 정규분포를 따르게 되는데 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_B = \frac{U}{k} \quad (3)$$

식(3)에서 U 는 인용 불확도이다. 인용 불확도는 확장불확도 형태를 갖는데 이는 기준에 통계적 분석을 수행하여 신뢰수준 및 포함인자를 내재하고 있는 것을 의미하므로 표준불확도를 구하기 위해 역으로 k 를 나누어 불확도로 활용한다.

두 번째는 신뢰수준이 주어지지 않은 경우이다. 이 때, 불확도의 분포는 직사각형 또는 삼각형 등 분포를 따르게 되는데 직사각형 분포를 따르는 경우는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_B = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (4)$$

식(4)에서 a 는 반범위(semi range)이다. 반범위는 측정값을 구성하는 입력량이 한계(상한 및 하한)를 갖는다고 가정할 때, 한계 범위를 반으로 나눈 수치를 반범위로 정의할 수 있다. 하지만, 입력량의 한계가 항상 직사각형 분포와 같이 연속성을 갖지 않는 것이 현실이다. 그렇다면 삼각형 분포로 대체하는 것이 합리적이며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_B = \frac{a}{\sqrt{6}} \quad (5)$$

위 식들을 통하여 산출된 각 A형 및 B형 표준불확도들을 하나의 합성표준불확도 u_c 로 표현해주어야 하는데, 합성표준불확도 u_c 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_c = \sqrt{(u_{A.1})^2 + (u_{B.2})^2 + \dots + (u_{A/B.n})^2} \quad (6)$$

유효자유도 V_{eff} 는 두 개 또는 그 이상의 t분포 합인 추정분산 성분을 t분포로 확신할 수 없기 때문에[1] 신뢰수준, k포함인자와 함께 구간 추정에 사용하여 분포를 근사한다.

유효자유도 V_{eff} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{v_i}} \quad (8)$$

식 (8)은 Welch-Satterthwaite[2] 공식이며, 이를 통하여 확장불확도는 근사적으로 신뢰수준 p 를 가지는 구간 $Y = y + U_p$ 를 제공한다.

식 (8)에서 v_i 는 자유도이며, 각 A형 및 B형의 자유도는 아래와 같이 나타낼 수 있습니다.

$$v_A(x) = n - 1 \tag{9}$$

$$v_B(x) = \frac{1}{2} \left(\frac{100}{R} \right)^2 \tag{10}$$

식 (9)는 A형 평가에 대한 자유도 계산 수식이며, n 는 반복측정횟수이다. 식 (10)는 B형 평가에 대한 자유도 계산 수식이며, 불확도 정보를 신뢰 할 수 있는지에 근거하여 자유도를 계산하게 된다. R 는 참고문서의 신뢰도(%) 수치이고, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R = (100 - R_D) \tag{11}$$

식 (11)에서 R_D 는 참고문서의 신뢰도인데, 공인기관에서 받은 교정성적서의 경우 소급성 유지가 명확하므로, 수치가 100이 된다. 그렇다면 식 (10)의 $v_B(x)$ 의 값은 ∞ 가 된다.

본 논문에서는 신뢰수준 p 는 한국인정기구(KOLAS) 지침에 따라 $V_{eff} < 10$ 의 경우에는 신뢰수준 95%, $V_{eff} \geq 10$ 의 경우 신뢰수준 95%, k 포함인자는 2로 설정한다. 측정결과에 대한 불확도를 표현할 때 합성표준불확도 u_c 를 제시할 수 있지만 특정분야에선 추정값의 대부분을 포함하는 것으로 기대되는 측정결과 주위 구간을 정의하는 불확도의 척도가 필요한 경우가 있다. 그래서 특정 신뢰수준에서 측정량이 포함될 수 있는 구간의 한계치를 포함하기 위하여 확장불확도 U 를 사용한다. 확장불확도 U 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$U = k \times u_c \tag{12}$$

식 (12)는 포함인자 k 와 합성표준불확도 u_c 를 곱하여 최종 확장불확도 U 를 산출하여 최종적으로 다음 그림 3과 같이 표현한다.

결과값 : (측정값 ± 확장불확도) 단위 (신뢰수준 ?%, $k = ?$)

[그림 3] Express Uncertainty of measurement

그림 3과 같이 불확도를 포함한 측정값의 최종 표현을 해주면 된다. 합성표준불확도와 확장불확도 표현은 대개 유효숫자를 두 자리까지 표현해준다. 불확도 값의 수치맺음은 올림으로 처리하는 것이 원칙이나, 일반적인 상식 선에서 판단한다. 또한 결과값은 불확도 값과 동일한 자리수로 결정해주어야 하며 유효자유도 산출 시 소수점 자리가 나온다면 포함인자 k 가 커지는 쪽으로 선택해야 한다.

2. 본론

2.1 개요

2.1.1 목적

삽입용 방탄판에 사격을 가하고 특정 매개체에 생긴

P-BFS에 대해 측정하고 불확도를 산출해보고자 한다.

2.1.2 방탄시험 방법

방탄물자 시험은 삽입용 방탄판(insert plate)로 선정하였고 방탄시험절차는 Ballistic Resistance of Body Armor(NIJ Standard-0101.06)를 준용하고 Armor Type IV으로 설정하여 진행하였다. Armor Type IV의 탄약제원 및 탄속은 다음 표 1에서 보는 바와 같다.

[표 1] 탄약 제원

Bullet	Mass	Velocity	Shots
.30 Caliber M2 AP	10.8 g	882.20 m/s	1

탄약은 장약량 조절(hand loading)를 통하여 탄속 범위는 (878 ± 9.1) m/s 설정하고 총 1발 사격을 실시하였다.

탄속 계측장비는 그림4 에서 보는 바와 같이 레이저 거리 측정기(distance meter)를 이용하여 루미라인 스크린을 총구로부터 각 2m, 3m 떨어진 위치에 설치하였다.



[그림 4] Test configuration

후면변형 측정에 사용되는 측정장비의 제원은 다음 표 2에서 보는 바와 같으며, 측정 방법은 그림5에서 보는 바와 같다.

[표 2] 측정장비 제원

Manufacturer	Model	Resolution	Range
Mitutoyo	VDS-P20	0.01 mm	0 - 200 mm
Calibration information			
Nominal value	Reding	Correction value	
44.00 mm	44.00 mm	0.00 mm	
Measurement uncertainty			
측정값 : (44.00 ± 0.01) mm (신뢰수준 95%, $k=2$)			

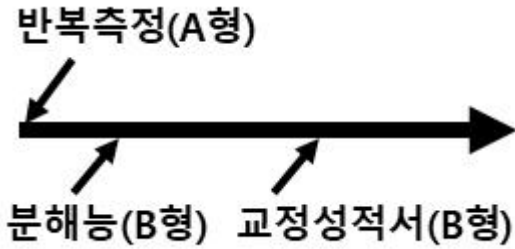


[그림 5] Method of measurement for P-BFS

2.2 P-BFS에 대한 측정 불확도 추정

후면변형 측정에 대한 불확도 요인은 다음 그림6에서 보는 바와 같다.

[그림 6] Uncertatiny factor about P-BFS measurement



반복측정(A형)은 위 그림5와 같은 P-BFS에 대해 10회 측정 한 결과는 다음 표3과 같고 표준불확도 u_A 는 식 (1)을 이용하여 다음 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

[표 3] 반복측정 결과

순번	측정값(mm)	표준편차	표준불확도(u_A)
1	34.91	0.028	0.009
2	34.87		
3	34.84		
4	34.87		
5	34.86		
6	34.94		
7	34.89		
8	34.90		
9	34.88		
10	34.90		
평균	34.89		

$$u_A = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}} = \frac{0.028}{\sqrt{10}} = 0.009(mm) \quad (13)$$

분해능(B형)이 갖는 표준불확도 u_{B1} 는 식 (4)를 이용하여 다음 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$u_{B1} = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{(0.01/2)}{\sqrt{(3)}} = 0.0029(mm) \quad (14)$$

고정성적서(B형)이 갖는 표준불확도 u_{B2} 는 식 (3)을 이용하여 다음과 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$u_{B2} = \frac{U}{k} = \frac{0.01}{2} = 0.005 \quad (15)$$

각 불확도 요인들의 표준불확도를 정리하면 다음 표4와 같이 나타낼 수 있다.

[표 4] 후면변형 측정에 대한 표준불확도

인자	추정값(mm)	표준불확도(mm)	확률분포
u_A	34.89	0.009	t
u_{B1}	0	0.0029	square
u_{B2}	0	0.005	normal

각 A형, B형의 표준불확도를 합한 합성표준불확도 $u_c(d)$ 는 위 식 (6)을 이용하여 다음 식 (16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_c(d) = \sqrt{(u_A)^2 + (u_{B1})^2 + (u_{B2})^2} \quad (16)$$

$$= \sqrt{(0.009)^2 + (0.0029)^2 + (0.005)^2} = 0.010667(mm)$$

식 (16)에서 보는 바와 같이 후면변형 측정에 대한 합성표준 불확도 $u_c(d)$ 는 0.010667 mm 이다. 각 요인의 자유도는 위 식 (9), 식 (9), 식 (10), 식 (11)을 이용하여 다음 표 5와 같이 나타낼 수 있다.

[표 5] 각 인자 및 유효자유도 산출

인자	자유도
v_A	$v_A(d) = n - 1 = 10 - 1 = 9$
v_{B1}	$v_{B1} = \frac{1}{2} \left(\frac{100}{R} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{100}{0} \right) = \infty$
v_{B2}	$v_{B2} = \frac{1}{2} \left(\frac{100}{R} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{100}{0} \right) = \infty$
유효자유도 v_{eff}	$\frac{(0.010667)^4}{\frac{(0.009)^4}{10} + \frac{(0.0029)^4}{\infty} + \frac{(0.005)^4}{\infty}} = 1864.13$

유효자유도 v_{eff} 는 1864.13으로 산출됐다. 이는 위 1.3.항에 따라 포함인자 k는 2가 된다. 이를 위 식 (12)를 이용하여 확장불확도 U_d 는 다음 식 (17)과 같이 나타낼 수 있다.

$$U_d = u_c(d) \times k = 0.010667 \times 2 = 0.021333 \quad (17)$$

후면변형량을 측정하는 측정기기의 표시는 소수점 두 번째 자리까지이므로, 유효숫자 정리와 최종 불확도 표현을 하면 다음 그림 7과 같이 나타낼 수 있다.

[그림 7] Uncertainty of measurement about P-BFS

$U: (34.89 \pm 0.02) mm$ (단, 신뢰수준 95%, $k=2$)

3. 결론

P-BFS 변형량 측정에 대한 불확도를 산출하기 위하여 불확도 요인을 식별하고 각 A형, B형 불확도 분류하여 최종 확장불확도를 산출한 결과 34.89 mm 추정값에 대해 불확도가 0.02 mm가 포함되어있음을 확인하였다. 이를 통하여 방탄물자가 갖는 방탄성능 평가 시 참고하는 자료가 되길 기대한다.

참고문헌

- [1] Nakhyun KIM, Uncertainty of measurement - Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement, Korea Standard, 2017
- [2] Welch, B.L., The generalization of "Student's: problem when several disserent population variance are involved", Biometrika, 34(1-2) pp.28-35 1947
- [3] ISO/IEC Guide 98-3, Uncertainty of measurement, ISO, 2008
- [4] U.S. National Institute of justice, "Ballistic Resistance of Body Armor".NIJ Standard-0101.06, NIJ Standard, 2008.
- [5] Byungwook JUN, "A study on the verification of regression analysis projectile velocity Estimating method", JKAIS, vol.23, no.1, pp.887-846, 2022