

제동 패드의 압축강도시편의 단면치수변화가 압축강도 불확도에 미치는 영향 분석

A Study on the Effects of Cross-sectional Dimension Change of Brake Pad Specimen on the Uncertainty of the Compressive Strength

박수홍* · 박진규 · 김시완 · 박찬경

Soo Hong Park · Jin Kyu Park · Si Wan Kim · Chan Kyoung Park

Abstract The brake pad is one of the basic brake elements of a railway vehicle. It accomplishes braking action by friction between a pad and a brake disc. Because the brake pad must endure specified high pressure, the compressive strength is managed as the main performance factor. The standards for measuring the compressive strength of brake pads are KRS, KRCS, and KRT. These standards specify the size of the test piece for measuring compressive strength as 20mm×10mm×15mm (W×D×H). To reduce the uncertainty of the compressive strength, factors of uncertainty were analyzed. The results show that changing the dimensions of the cross section was useful to reduce the uncertainty. The uncertainty due to the new cross-sectional dimension shows the effectiveness of reducing uncertainty.

Keywords : Brake pad, Compressive strength, Cross-sectional dimension, Uncertainty

초 록 제동 패드는 철도차량의 기초제동요소 중 하나이다. 제동 패드는 제동 캘리퍼로부터 압부력을 전달받아 제동디스크와의 마찰력으로 철도차량에 제동작용을 한다. 따라서 제동 패드는 주어진 고압의 압부력을 견뎌야 하므로 제동 패드의 주요 성능평가항목으로 압축강도를 관리한다. 압축강도를 측정하는 규격은 KRS, KRCS, KRT 등이 있다. 이들 규격은 압축강도를 측정하기 위한 시험편의 크기를 20mm×10mm×15mm (가로×세로×높이)로 규정하고 있다. 압축강도에 대한 불확도를 줄이기 위하여 불확도 요인을 분석한 결과, 단면의 치수를 변경함으로써 불확도를 줄일 수 있음을 알았다. 새로운 단면치수에 의한 불확도를 평가하여 불확도 감소에 대한 유효성을 입증하였다.

주요어 : 제동 패드, 압축강도, 단면치수, 불확도

1. 서 론

제동 패드는 철도차량의 기초제동요소 중 하나로서 제동 캘리퍼로부터 압부력을 전달받아 제동디스크와의 마찰력을 발생시켜 철도차량의 제동작용을 수행한다. 따라서 제동 패드는 주어진 고압의 압부력을 견뎌야 하므로 제동 패드의 주요 성능평가항목 중 하나로 압축강도를 관리한다[1-3]. 또한 국토교통부는 최근 철도안전을 강화하는 방향으로 철도안전법을 개정하여 주요 철도용품에 대해서는 형식승인을 받게 하였고, 2014년 3월 19일부터 시행 중이다. 이와 관련하여 형식승인 대상 철도용품의 기술기준이 준비되고 있다. 제동 패드도 형식승인 대상 철도용품중 하나로 선정되어 압축강도와 마찰계수등의 항목에 대한 기술기준이 준비되고 있다. 이 기술기준에는 제동 패드 종별 압축강도에 대한 형식승인

기준이 제시된다. 이 기준에는 기준치와 허용오차가 있다. 허용오차는 측정불확도를 고려하여 산정하여야 한다. 1993년에 국제표준화기구(ISO)에서 시험분석 및 교정결과의 품질에 대한 척도로서 측정불확도 표현지침(Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement: GUM)[4]이 제시되었고, 미국국립표준기술연구소(National Institute of Standards and Technology, NIST, USA)에서 Guideline이 발간되었다[5]. 국내에서는 한국표준과학연구원에서 1998년도에 측정불확도 표현지침[6]을 발간한 이후, 2000년도에 KOLAS(Korea Laboratory Accreditation Scheme) 사무국에서 측정결과의 불확도 산정 및 표현을 위한 지침[7]을 발간하여 국제공인시험기관의 측정불확도 추정 능력을 의무화하고 있다.

본 연구에서는 제동 패드의 압축강도의 기준치에 대한 허용오차를 산정하기 위해 측정불확도를 평가하였고, 이를 줄이기 위해 측정불확도 인자를 분석하여 단면적 치수가 측정불확도의 크기에 미치는 영향이 큼을 알았고, 압축강도 시험편의 단면치수를 바꿈으로써 압축강도의 불확도를 13% 줄일 수 있었다.

*Corresponding author.

Tel.: +82-2-860-1510, E-mail : psh@ktl.re.kr

©The Korean Society for Railway 2014

http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2014.17.4.223

2. 본 론

2.1 압축강도의 측정불확도 산정

압축강도란 단위면적당 소재가 견디는 최대압축력(압축파단하중)이다. 따라서 압축강도 σ 는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{W \cdot D} \quad (1)$$

여기서, F : 압축파단하중, A : 시료의 단면적, W : 시료의 폭, D : 시료의 길이.

압축강도의 불확도에는 통계적으로 얻어질 수 있는 A타입 불확도와 통계적으로 얻어질 수 없는 B타입 불확도로 나뉜다. A타입 표준불확도 u_A 는 다음과 같다.

$$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

여기서, s : 각 물리량(시료의 폭, 길이, 압축파단하중)의 표본표준편차, n : 시료의 개수.

즉 폭, 길이, 압축파단하중의 A타입 표준불확도는 다음과 같다.

$$u_{AW} = \frac{s_W}{\sqrt{n}}, u_{AD} = \frac{s_D}{\sqrt{n}}, u_{AF} = \frac{s_F}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

여기서, u_{AW} : 폭의 표준불확도, s_W : 폭의 표본표준편차, u_{AD} : 길이의 표준불확도, s_D : 길이의 표본표준편차, u_{AF} : 압축파단하중의 표준불확도, s_F : 압축파단하중의 표본표준편차.

B타입 표준불확도 u_B 는 측정장비의 교정 불확도 u_{B1} , 측정장비의 분해능 불확도 u_{B2} 등의 인자가 있다. 압축강도 측정에 사용된 측정장비는 시료의 단면치수(폭, 길이)를 측정하기 위한 버어니어 캘리퍼스와 시료의 압축파단하중측정을 위한 만능재료시험기(UTM)가 있다. 버어니어 캘리퍼스와 만능재료시험기 각각의 교정 불확도는 각 장비의 교정 성적서상의 확장불확도를 포함인자로 나눈값을 사용하며 다음과 같다.

$$u_{BV1} = \frac{U_V}{k_V}, u_{BUTM1} = \frac{U_{UTM}}{k_{UTM}} \quad (4)$$

여기서, u_{BV1} : 버어니어 캘리퍼스의 교정 불확도, U_V : 버어니어 캘리퍼스의 교정 성적서상의 확장불확도, k_V : 버어니어 캘리퍼스의 교정 성적서상의 포함인자, u_{BUTM1} : 만능재료시험기의 교정 불확도, U_{UTM} : 만능재료시험기의 교정 성적서상의 확장불확도, k_{UTM} : 만능재료시험기의 교정 성적서상의 포함인자.

마찬가지로 각 장비의 분해능에 의한 불확도는 버어니어 캘리퍼스와 만능재료시험기의 눈금의 확률분포가 사각분포이므로 분해능 반범위를 $\sqrt{3}$ 으로 나눈값을 표준불확도로 하며 다음과 같다.

$$u_{BV2} = \frac{U_V}{\sqrt{3}}, u_{BUTM2} = \frac{U_{UTM}}{\sqrt{3}} \quad (5)$$

여기서, u_{BV2} : 버어니어 캘리퍼스의 분해능 불확도, u_{BUTM2} : 만능재료시험기의 분해능 불확도.

지금까지 불확도 요인(두께, 폭, 압축파단하중)별 A, B타입 표준불확도를 구하였다. 이들로부터 불확도 요인별 합성 불확도를 각각의 A, B타입 표준불확도를 각각 제곱하여 더한 후 제곱근을 취하여 얻는다.

$$u_{cW} = \sqrt{(u_{AW}^2 + u_{BV1}^2 + u_{BV2}^2)} \quad (6)$$

$$u_{cD} = \sqrt{(u_{AD}^2 + u_{BV1}^2 + u_{BV2}^2)} \quad (7)$$

$$u_{cF} = \sqrt{(u_{AF}^2 + u_{BUTM1}^2 + u_{BUTM2}^2)} \quad (8)$$

여기서, u_{cW} : 폭에 대한 합성불확도, u_{cD} : 길이에 대한 합성 불확도, u_{cF} : 압축파단하중에 대한 합성불확도.

또한 합성불확도들의 자유도는 아래식에 의해 구할 수 있다.

$$v_{ci} = \frac{u_{ci}^4(y)}{\sum \frac{u_i^4(y)}{v_i}} \quad (9)$$

여기서, v_{ci} : 합성불확도의 유효자유도, u_{ci} : 합성불확도, u_i : 표준불확도, v_i : 표준불확도의 자유도.

식(6)~(8)에서 구한 불확도 요인별 합성불확도를 하나로 묶기 위해 각각의 감도계수 c_W , c_D , c_F 는 아래와 같이 구한다.

$$c_W = \frac{\partial \sigma}{\partial W} = -\frac{F}{W^2 D}, c_D = \frac{\partial \sigma}{\partial D} = -\frac{F}{W D^2}, c_F = \frac{\partial \sigma}{\partial F} = \frac{1}{W D} \quad (10)$$

여기서, c_W : 폭에 대한 감도계수, c_D : 길이에 대한 감도계수, c_F : 압축파단하중에 대한 감도계수.

불확도 요인별 불확도기여도는 합성불확도에 감도계수를 곱하여 구한다.

$$u_W = c_W \cdot u_{cW}, u_D = c_D \cdot u_{cD}, u_F = c_F \cdot u_{cF} \quad (11)$$

합성표준불확도는 식(11)의 요인별 불확도 기여도 각각의 제곱의 합에 제곱근을 취하여 구한다.

$$u(y) = \sqrt{(u_W^2 + u_D^2 + u_F^2)} \quad (12)$$

여기서 확장불확도를 구하기 위해 포함인자를 구하려면 합성표준불확도의 유효자유도를 계산해야 한다. 식(9)를 인용하여 아래와 같이 구한다.

$$v_{eff} = \frac{u^4(y)}{\sum \frac{u_{ci}^4(y)}{v_{ci}}} \quad (13)$$

식(13)에서 구해진 유효자유도와 t-분포표를 참조하여 포함인자 k 를 구한 후 식(12)에서 구한 합성표준불확도에 곱하여 확장 불확도 U 를 구할 수 있다.

$$U = k \cdot (y) \quad (14)$$

2.2 기존 시험편에 대한 측정불확도 계산

기존 규격에 따라 Fig. 1과 같이 압축강도 시편을 제작하여 Table 1과 같이 압축강도를 구하고 식(1) ~ 식(14)에 의해 확장 불확도 U 를 구하였다.

Table 1 Calculation of compressive strength for 20mm*10mm specimen

Specimen no.	Width (mm)	Depth (mm)	Force (N)	Area (mm ²)	Compressive strength (N/mm ²)
1	19.79	10.04	6889.4	198.69	34.67
2	19.80	10.02	7265.7	198.40	36.62
3	19.79	10.00	6918.8	197.90	34.96
4	19.84	10.03	7018.8	199.00	35.27
5	19.74	10.00	6172.0	197.40	31.27
Average	19.79	10.02	6852.9	198.28	34.56



Fig. 1 Specimen for compressive strength

유효자유도가 4.20928이므로 t-분포표를 참조하여 95% 신뢰구간에서의 포함인자 k 를 구하면 2.87이다, 따라서 95% 신뢰구간에서의 압축강도의 확장불확도는 2.68N/mm²이다. 이는 압축강도 추정치의 7.8%수준으로 상당히 불확도가 큰 편이다.

2.3 기존 시험편에 대한 측정불확도 요인별 기여도 분석

압축강도의 확장불확도를 줄이기 위하여 Table 2에서 각 요인별 불확도 기여도를 살펴보면 압축하중 불확도 기여도는 0.93192N/mm², 폭 불확도 기여도는 -0.02901N/mm², 깊이 불확도 기여도는 -0.03404N/mm²이다. 식(11)에서 본 바와 같이 불확도 기여도는 감도계수와 표준불확도의 곱이다. 그리고 각 요인별 표준불확도는 시료의 특성, 시험자와 기준장비를 교체 또는 개선하지 않는 한 좋아질 수 없다. 따

Table 2 Uncertainty budget for 20mm*10mm specimen

Source of uncertainty	Value	Standard uncertainty	Probability distribution	Sensitivity coefficient	Contribution to the uncertainty	Degree of freedom		
Compressive breaking load(N)	F	6852.94	184.77811		0.00504	0.93192	4.18963	∞
	δ _{f1}	-	182.65083	t	1	182.65083	5	A type
	δ _{f2}	-	27.95756	Rectangular	1	27.95756	∞	B type(calibration)
	δ _{f3}	-	0.00289	Rectangular	1	0.00289	∞	B type(resolution)
Width(mm)	W	19.79	0.01695		-1.74629	-0.02901	5.11876	
	δ _{w1}	-	0.01594	t	1	0.01594	5	A type
	δ _{w2}	-	0.00500	Rectangular	1	0.00500	∞	B type(calibration)
	δ _{w3}	-	0.00289	Rectangular	1	0.00289	∞	B type(resolution)
Depth(mm)	D	10.02	0.00987		-3.45005	-0.03404	9.25174	
	δ _{w1}	-	0.00800	t	1	0.00800	5	A type
	δ _{w2}	-	0.00500	Rectangular	1	0.00500	∞	B type(calibration)
	δ _{w3}	-	0.00289	Rectangular	1	0.00289	∞	B type(resolution)
Compressive strength (N/mm ²)	σ	34.56	0.93301				4.20928	

Table 3 Calculation of compressive strength for 13mm*13mm specimen

Specimen no.	Width (mm)	Depth (mm)	Force (N)	Area (mm ²)	Compressive strength (mm ²)
1	13.16	13.20	5535.0	173.71	31.86
2	13.12	13.17	6130.9	172.79	35.48
3	13.17	13.18	5654.6	173.58	32.58
4	13.17	13.20	5405.7	173.84	31.10
5	13.14	13.16	5364.5	172.92	31.02
Average	13.15	13.18	5618.1	173.37	32.41

라서 불확도 기여도를 줄이기 위해서는 감도계수를 줄이는 수 밖에 없다. 여기서 압축과단하중의 감도계수는 식(11)에 알 수 있듯이 폭과 깊이곱에 반비례하며, 폭의 감도계수는 폭의 제곱과 깊이의 곱에 반비례하며, 깊이의 감도계수는 깊이의 제곱과 폭의 곱에 반비례한다. 이를 종합해 보면 폭과 깊이의 크기가 같은 정사각형의 단면이 감도계수를 최소화할 수 있음을 알 수 있다.

2.4 단면치수의 변경에 따른 불확도의 변화

앞 절에서 단면을 정사각형으로 함으로써 감도계수를 줄일 수 있음을 알았다. 따라서 이를 검증하기 위하여 폭과 깊이를 20mm와 10mm에서 13mm와 13mm로 바꾸어 압축강도를 측정하였다.

폭과 깊이치수를 바꿈으로써 압축과단하중, 폭, 깊이의 불

확도기여도가 각각 0.93192N/mm², -0.02901N/mm², -0.03404N/mm²에서 0.81190N/mm², -0.02780N/mm², -0.02425N/mm²로 12.9%, 4.2%, 2.9% 감소하였다. 유효자유도가 4.35322이므로 t분포표를 참조하여 95%신뢰구간에서의 포함인자 k를 구하면 2.87이다, 따라서 95% 신뢰구간에서의 압축강도의 확장불확도는 2.33N/mm²이다. 이는 기존시편의 확장불확도 2.68N/mm²에 비해 13%가 감소된 것이다. 이로써 압축강도 측정시 단면을 정사각형으로 변경하여 불확도를 감소할 수 있음을 알 수 있었다.

3. 결 론

본 연구에서는 제동 패드의 압축강도의 기준치에 대한 허용오차를 산정하기 위해 측정불확도를 평가하였고, 이를 줄이기 위해 측정불확도 인자를 분석하여 단면적 치수가 측정 불확도의 크기에 미치는 영향을 큼을 알았고, 압축강도 시편의 단면치수를 바꿈으로써 압축강도의 불확도를 13% 줄일 수 있었다. 이로써 철도차량에 쓰이는 제동 패드의 압축강도평가의 불확도를 줄임으로써 좀 더 정확한 측정이 이루어질 수 있게 되었다. 또한 이를 바탕으로 앞으로 제정될 철도용품의 기술기준의 허용오차 산정에 도움이 되길 바란다.

후 기

본 연구는 국토교통부 미래철도기술개발사업의 “차량/궤도/환경분야 철도용품 인증을 위한 실내/현장 시험규격 정비 및 인증체계 개선방안 연구”과제의 지원을 받고 있음을 밝힙니다.

Table 4 Uncertainty budget for 13mm*13mm specimen

Source of uncertainty	Value	Standard uncertainty	Probability distribution	Sensitivity coefficient	Contribution to the uncertainty	Degree of freedom		
Compressive breaking load (N)	F	5618.14	140.75882		0.00577	0.81190	4.33531	
	δ _{F1}	-	137.95441	t	1	182.65083	5	A type
	δ _{F2}	-	27.95756	Rectangular	1	27.95756	∞	B type(calibration)
	δ _{F3}	-	0.00289	Rectangular	1	0.00289	∞	B type(resolution)
Width(mm)	W	13.15	0.01128		-2.46393	-0.02780	7.33987	
	δ _{W1}	-	0.00970	t	1	0.01594	5	A type
	δ _{W2}	-	0.00500	Rectangular	1	0.00500	∞	B type(calibration)
	δ _{W3}	-	0.00289	Rectangular	1	0.00289	∞	B type(resolution)
Depth(mm)	D	13.18	0.00987	∞	-2.45832	-0.02425	9.25174	
	δ _{w1}	-	0.00800	t	1	0.00800	5	A type
	δ _{w2}	-	0.00500	Rectangular	1	0.00500	∞	B type(calibration)
	δ _{w3}	-	0.00289	Rectangular	1	0.00289	∞	B type(resolution)
Compressive strength (N/mm ²)	σ	32.41	0.81274				4.35322	

References

- [1] S.T. Kwon, W.K. Kim, J.K. Kim, S.H. Yoon (2004) A study on friction coefficient of disk brake lining for rolling stock according to dick type, *Proceedings of Korean Society for Railway Autumn Conference*, Seoul, pp. 472-476.
- [2] H.K. Gil, T.H. Ko, D.H. Cho, S.H. Han *et al.* (2007) Compatibility evaluation between NCM-CV cast iron brake disk and various pads, *Journal of the Korean Society for Railway*, 10(3), pp. 251-256.
- [3] S.T. Kwon, J.G. Kim, J.W. Seo, T.S. Kwon (2009) An investigation on standards creation of brake friction materials for railway vehicles, *Proceedings of Korean Society for Railway Spring Conference*, Gyeongju, pp. 1132-1138.
- [4] ISO (1993) Guide to the expression of uncertainty in measurements, International Organization for Standardization.
- [5] NIST (1993) Guideline for evaluating and expressing the uncertainty of NIST measurement results, NIST Technical Note 1297.
- [6] KRISS (1998) Guide to the Expression of uncertainty in measurement, KRISS.
- [7] Korea Laboratory Accreditation Scheme (2000) Guideline for quantifying and expressing the uncertainty in measurement results, Korea Laboratory Accreditation Scheme, KOLAS-G-002.
- 접수일(2014년 5월 27일), 수정일(2014년 7월 25일),
게재확정일(2014년 8월 6일)
-
- Soo Hong Park:** psh@ ktl.re.kr
System Technology Center, Korea Testing Lab., 87 26-Gil Digital-Ro, Guro-Gu, Seoul 152-718, Korea
- Jin Kyu Park:** jkpark@ ktl.re.kr
System Technology Center, Korea Testing Lab., 87 26-Gil Digital-Ro, Guro-Gu, Seoul 152-718, Korea
- Si Wan Kim:** siwan77@krri.re.kr
Railroad Safety and Certification Center, Korea Railway Research Institute, 176, Cheoldobangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do, 437-757, Korea
- Chan Kyoung Park:** ckpark@krri.re.kr
Railroad Safety and Certification Center, Korea Railway Research Institute, 176, Cheoldobangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do, 437-757, Korea