

도로포장에서 표면조각깊이 측정에 대한 통계적 게이지 R&R 분석

A Statistical Gauge R&R Study on Measurements of Surface Texture Depth in Pavement

임정규* · 김성준** · 최돈화*** · 이승우****

Lim, Jung Gyoo · Kim, Seong Jun · Choi, Don Hwa · Lee, Seung Woo

1. 서 론

제품 및 서비스의 품질수준에 대한 요구가 높아지면서 측정시스템의 중요성이 점차 커지고 있다. 품질개선 업무를 하다보면 제품 품질의 문제보다 측정 자체의 문제인 경우도 많기 때문이다. 수준높은 측정시스템을 확보하지 않고서는 고품질 달성은 요원하다고 하겠다. 측정시스템 분석은 바로 이러한 요구에서 출발한다. 시료의 반복적인 측정을 통해 측정시스템의 성능을 평가할 수 있다. 이를 위한 대표적인 기법이 게이지 R&R 분석 (Gage R&R Study)이다. 게이지 R&R 분석은 제조 및 생산 부문에서는 보편화되어 사용되고 있다. 자동차부품 분야의 글로벌 품질기준인 QS9000에서는 이미 필수항목으로 포함하고 있다 (이승훈, 2003). 여기서 R&R이라 하면, 반복성 (Repeatability)과 재현성 (Reproducibility)을 의미한다. 반복성은 동일 시료를 반복해서 측정했을 때 얼마나 오차가 작은가를 의미하는 것으로 측정시스템의 정밀도와 관계가 있다. 재현성은 측정시스템이 측정환경에 얼마나 민감한가를 말한다. 예를 들어, 평가자에 따라 측정결과가 일관성이 없다면 그 측정시스템은 재현성이 부족한 것이다.

도로포장 분야에서는 최근 친환경 포장기법에 대한 관심이 고조되고 있다. 그러한 시도 중의 하나로서 저소음 포장에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 소음은 미끄럼저항과 관계가 깊은 것으로 알려져 있다 (이승우, 2003; 김남철, 2004). 포장표면조각이 얼마나 많은 미끄럼저항을 유발하는지는 평균조각깊이 (MTD, Mean Texture Depth)의 측정을 통해 가능하다. 현장에서 MTD 측정을 위해 주로 사용되는 기법은 모래를 이용하는 것으로 Sand Patch 방법이 있다. 하지만 사용자에 따라서 결과가 일정치 않는 등 문제점이 발생할 수 있다.

본 논문은 게이지 R&R 분석을 이용해 MTD 측정방법의 반복성 및 재현성을 평가한다. 특히 포장표면의 종류에 따라 R&R 성능이 어떻게 변화하는지 고찰하기 위해 4 종류의 포장기법에 대해 MTD 반복측정 테스트를 실시하였다. 분석결과에 따르면, Sand Patch 방법에 의한 측정실험은 R&R이 다소 미흡한 것으로 나타났다.

2. MTD 측정실험 준비

표면조각깊이의 측정을 위해 본 실험에서는 Sand Patch Method (SPM)를 이용한다. ASTM(2001)에서 명

* 학생회원 · 강릉대학교 산업공학과 석사과정 · 033-640-2370(E-mail : sbpoteto@nate.com)

** 강릉대학교 산업공학과 교수 · 공학박사 · 033-640-2375(E-mail : sjkim@gwnu.ac.kr)

*** 학생회원 · 강릉대학교 토목공학과 · 석사과정 · 033-640-2416(E-mail : mynamedona@naver.com)

**** 정회원 · 강릉대학교 토목공학과 교수 · 공학박사 · 033-640-2419(E-mail : swl@gwnu.ac.kr)

시하고 있는 이 방법은 적용하기 간편하여 도로포장 현장에서 널리 사용되고 있다. 측정절차는 다음과 같다.

- 시험노면은 깨끗하고 건조한 상태를 유지하고 줄눈, 균열, 25mm이상의 패인 자국 등이 있는 부분은 피한다. 또한 이물질이 없도록 표면을 청소한다. 먼저 철사브러시로 1차 청소하고 부드러운 솔로 2차 청소를 실시한다.
- 시험노면 주위에 휴대용 바람막이를 친다.
- 모래는 60번체를 90% 이상 통과하고 80번체에 100% 잔류하는 입도를 사용한다. 사용량은 25cm² 이상으로 한다.
- 모래를 청소된 시험노면 위에 붓고 원판형의 흡손을 이용하여 모래가 측정면의 요철을 모두 메우면서 고르게 퍼질 수 있도록 하고 가능한 한 넓은 원형으로 넓힌다. 흡손의 재질은 아크릴수지로 하였다.
- 넓힌 모래원의 직경을 mm 단위로 4개 이상 측정하고 그 측정치 및 평균치를 기록한다.

위에서 모래의 직경을 V 라 하고 모래원의 직경을 D 라고 하면 MTD는 다음과 같은 관계식을 통해 얻을 수 있다.

$$MTD = \frac{4V}{\pi D^2}$$

다음 그림은 타이닝, 골재노출, RCCP, 아스팔트 등 4가지의 포장노면에 대해 SPM을 적용한 결과를 보여 주고 있다.

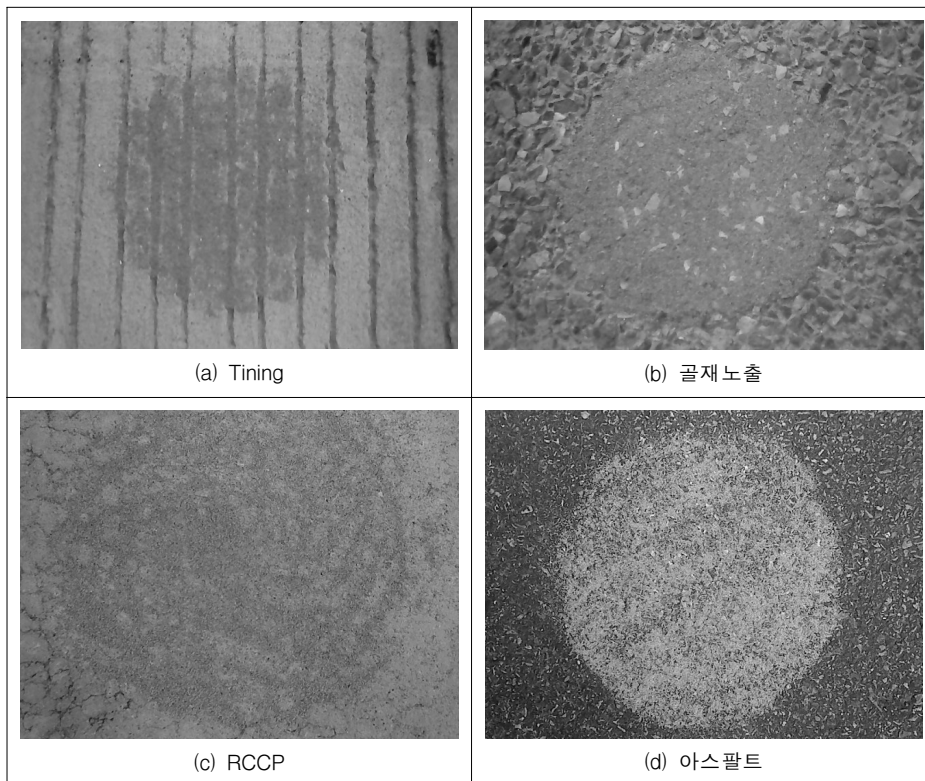


그림 1. 포장노면조직의 종류에 따른 SPM 적용

3. MTD 측정시스템 분석

3.1 측정실험과 데이터

SPM에 대한 게이지 R&R 분석을 수행하기 위한 측정데이터는 반복이 있는 이원배치법 (Two-way Classification)을 통해 수집하기로 한다. 즉 테스트용 포장노면시료를 3수준, 평가자를 4수준으로 하고 각 조건에서 3회의 반복측정이 이루어진다. 다음 표 1은 타이닝노면에 대한 MTD 측정실험 결과를 보여주고 있다.

표 1. 타이닝노면에 대한 MTD 측정데이터

Sample	Appraiser	Replicates		
		1	2	3
1	1	1.244	1.5574	1.4738
1	2	1.9668	1.9514	1.87
1	3	2.0965	1.8917	1.8209
1	4	1.4249	1.6424	1.4688
2	1	1.6326	1.7867	1.5212
2	2	1.35	1.4296	1.4166
2	3	1.6872	1.6761	1.6596
2	4	1.4123	1.6219	1.5604
3	1	1.5473	1.6278	1.7471
3	2	1.4476	1.4072	1.4854
3	3	1.6527	1.7308	1.8439
3	4	1.3423	1.4033	1.4191

3.2 분산분석 및 그래프고찰

우선 표 1의 데이터에 대해 분산분석 (Analysis of variance, ANOVA)을 수행한다. 분산분석의 목적은 측정결과에 유의한 영향을 주는 요인이 무엇인지 식별하는데 있다. 다음 표는 통계 소프트웨어인 MINITAB R14를 이용하여 얻은 분산분석표를 보여주고 있다(MINITAB, 2004).

표 2. 타이닝노면 MTD에 대한 ANOVA

Source	DF	SS	MS	F	P
Sample	2	0.16177	0.080887	0.8116	0.488
Appraiser	3	0.44848	0.149494	1.4999	0.307
Interaction	6	0.59800	0.099666	10.2507	0.000
Error	24	0.23335	0.009723		
Total	35	1.44160			

표에서 알 수 있듯이, 시료 (Sample) 및 평가자 (Appraiser) 요인에 대한 P값이 각각 0.488과 0.307로 나타났다. 시료와 평가자 간의 교호작용 (Interaction)은 P값이 0이므로 측정결과에 매우 유의한 효과를 갖고 있음을 알 수 있다. 분산 (MS: Mean of Squares) 관점으로는 평가자 요인이 가장 커서 재현성에 문제가 있음을 시사하고 있는 반면 Error의 MS 값은 0.009723으로 매우 작아서 반복성은 상대적으로 양호하다고 판단된다. 이원배치에 의한 분산분석에 대해서는 박성현(2003)을 참고하기 바란다.

개별 측정결과가 어떻게 변화하고 있는지를 한눈에 파악하는 데에는 Run Chart가 유용하다. 다음 그림에는 MINITAB을 이용하여 작성한 Run Chart가 도시되어 있다.

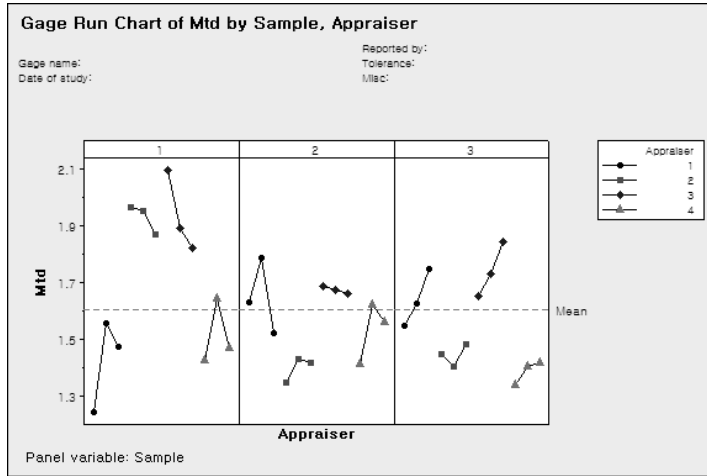


그림 2. MTD 측정결과에 대해 작성된 Run Chart

첫 번째 시료에 대해서는 평가자에 따른 측정결과가 비교적 큰 차이를 보인다. 이는 평가자가 첫 번째 측정 당시 긴장을 한다든지 동작이 다소 서툴다든지 하는 데서 오는 현상으로 이해된다. 따라서 1-2회의 예비 실험을 통해 측정에 적응할 수 있도록 할 필요가 있다. Run Chart에 나타난 결과를 요인 별로 정리하면 다음과 같은 그래프를 얻을 수 있는 데 이를 요인효과도라고 부른다.

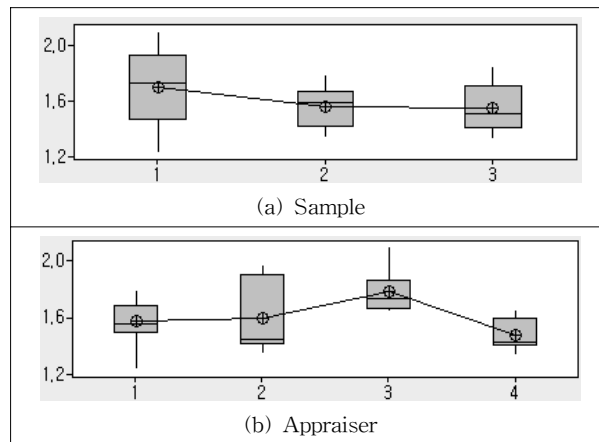


그림 3. MTD에 대한 시료와 평가자의 요인효과

역시 첫 번째 시료에 대한 측정결과가 산포가 큰 것으로 나타났다. 평가자 관점에서는 2번 평가자의 측정이 다소 일관성이 없음을 알 수 있다. 게이지 R&R 분석에서는 원래 평가자를 랜덤하게 취하지만 평가자 간의 차이를 확인하고자 본 실험에서는 평가자 수준을 고정시켜 보았다. 상대적으로 훈련이 잘 된 평가자는 4번이라는 점을 참고하기 바란다. 한편, 시료와 평가자간의 교호작용도 다음과 같은 그래프로 나타낼 수 있다.

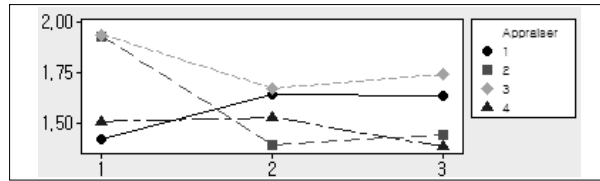


그림 4. MTD에 대한 교호작용

첫 번째 시료에 대해서는 4명의 평가자가 큰 차이를 보이지만 그 이후에는 별 차이가 없다. 평가자 4는 측정결과가 가장 안정되어 있는 것으로 판단된다.

MINITAB을 이용하면 평가자의 특성을 관찰할 수 있는 또 하나의 도구로서 다음 그림의 R chart와 \bar{x} chart를 얻을 수 있다. 위쪽의 R chart는 반복측정치 3개의 범위 R을 타점한 것으로 평가자의 반복오차를 알 수 있으며 반복성 평가에도 기초가 된다. 대체로 일정하게 나타났지만, 상대적으로 1번 평가자의 반복오차가 비교적 크고 2번 평가자는 오히려 작음을 알 수 있다. 반면 표본에 따른 측정치의 평균인 \bar{x} 는 평가자에 따라 큰 차이를 나타내고 있다. 평가자 2와 3은 측정값을 크게 평가자 1과 4는 측정값을 작게 얻는 경향을 갖는다. 특히 평가자 2는 반복오차는 작았음에도 시료 간에는 큰 차이를 보이고 있어서 주의가 요망된다. R chart 및 \bar{x} chart의 자세한 작성법에 대해서는 Montgomery (2005)를 참고하기 바란다.

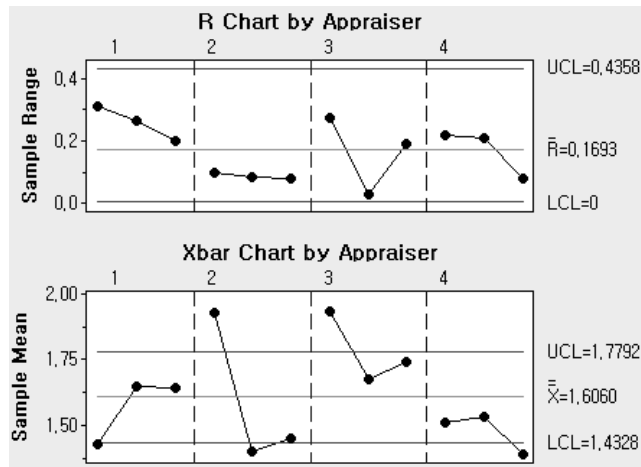


그림 5. MTD에 대한 R chart와 \bar{x} chart

3.3 R&R 평가

측정값들이 갖는 총변동 (Total Variation)은 시료에 의한 변동과 R&R에 의한 변동, 즉

$$\sigma_{total}^2 = \sigma_{part}^2 + \sigma_{RR}^2$$

와 같이 분해할 수 있다. 시료변동 σ_{part}^2 은 동일한 제품이라도 다른 특성을 보일 수 있는 것처럼 제조 상에서 나타나는 변동을 말한다. 따라서 σ_{part}^2 이 작다면 표본시료 간의 차이가 작다는 것이고 그만큼 제조능력이 우수하다는 뜻이 된다. 반면 σ_{RR}^2 은 측정의 불완전성으로 야기되는 측정변동이다. 계기, 측정환경, 평가자 등이 모두 측정변동의 주요 요인이 된다. 일반적인 품질관리나 공정관리는 σ_{RR}^2 이 충분히 안정되어 있다는 전제

하에 σ_{part}^2 을 관리하는 활동으로 이해할 수 있다. 따라서 비교적 큰 σ_{RR}^2 이 얻어진다면 품질관리나 공정관리 이전에 측정시스템을 개선하는 데 노력을 집중해야 한다.

MINITAB을 이용한 게이지 R&R 분석결과는 다음의 표 3으로 요약된다. 표에 제시된 바와 같이, 각 변동에 대한 표준편차는 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$\hat{\sigma}_{total} = 0.212698, \hat{\sigma}_{part} = 0.00, \hat{\sigma}_{RR} = 0.212698$$

반복성과 재현성에 대한 표준편차는 각각 $\hat{\sigma}_{repeatability} = 0.098605$ 와 $\hat{\sigma}_{reproducibility} = 0.188461$ 이다. 따라서 R&R의 분산은 다음과 같이 추정된다.

$$\begin{aligned} \sigma_{RR}^2 &= \sigma_{repeatability}^2 + \sigma_{reproducibility}^2 \\ &= 0.098605^2 + 0.188461^2 \\ &= 0.212698^2 \end{aligned}$$

따라서 총변동에 대한 비율로 환산하면,

$$\begin{aligned} \%Repeatability &= \frac{0.098605}{0.212698} = 46.36\% \\ \%Reproducibility &= \frac{0.188461}{0.212698} = 88.60\% \end{aligned}$$

가 됨을 알 수 있다. 따라서 Total Gage R&R은 $\%R\&R = 0.212698/0.212698 = 100\%$ 로 계산이 된다. 이는 관측된 변동은 모두 측정변동이며 표본시료에 의한 변동은 무시할만큼 작다는 의미가 된다. 따라서 타이닝노면에 대한 현 측정방법으로는 적절한 MTD 데이터수집이 곤란하며 측정시스템이나 과정에 많은 개선을 요한다고 하겠다.

표 3. 타이닝노면 MTD에 대한 게이지 R&R 분석

Source	StdDev (SD)	Study Var (6 * SD)	%Study Var (%SV)
Total Gage R&R	0.212698	1.27619	100.00
Repeatability	0.098605	0.59163	46.36
Reproducibility	0.188461	1.13077	88.60
Appraiser	0.074407	0.44644	34.98
Interaction	0.173151	1.03890	81.41
Part-To-Part	0.000000	0.00000	0.00
Total Variation	0.212698	1.27619	100.00

동일한 방법으로 골재노출, RCCP, 아스팔트에 대해서도 표면조직 테스트를 실시하고 MTD 측정결과에 대해 게이지 R&R 분석을 적용하고 그 결과를 다음 표 4에 요약한다.

표 4. 게이지 R&R 분석 요약

	%Repeatability	%Reproducibility	%R&R	%P	구별력(D)
타이닝	46.36	88.6	100	0	1*
골재노출	42.15	86.92	96.6	25.85	1
RCCP	18.46	98.28	100	0	1*
아스팔트	63.77	42.56	47.49	77.03	2

다른 포장노면의 경우도 측정능력이 매우 떨어지는 것으로 나타났다. 단 아스팔트는 측정결과가 상대적으로 양호한 것으로 조사되었지만 이는 노면시료를 구하지 못하고 실제 아스팔트포장노면에서 실시한 데 기인한 것으로 판단된다.

%R&R 이외에도 구별력 혹은 구별범주 (Discrimination Ratio)는 측정시스템의 성능을 나타내는 또 하나의 지수로서 널리 활용되고 있다. 전술한 바와 같이 총변동을 시료변동과 측정변동으로 분해하고 $\rho = 1 - \sigma_{RR}^2 / \sigma_{total}^2$ 라고 두면 구별력은 다음과 같이 정의된다. (이승훈, 2006)

$$D = \sqrt{\frac{1+\rho}{1-\rho}} \approx 1.41 \frac{\sigma_{part}}{\sigma_{RR}}$$

, 표 4에는 $D=0$ 인 경우도 1로 기입하고 *로 표시해 두었다. 구별력의 수치가 높을수록 더 정밀한 측정이 가능하고 따라서 표본시료를 더욱 상세하게 구분할 수 있음을 의미한다. $D=1$ 의 경우는 Pass-Fail 판정 만이 가능한 계수형 측정시스템에 해당되며 품질개선이나 공정관리용으로는 부적합하다. 구별력이 2 이상은 되어야 측정시스템으로서 최소한의 기능을 갖는다고 말할 수 있다.

4. 결 론

본 논문은 Sand Patch 방법을 이용한 MTD 측정실험에 대해서 게이지 R&R 분석을 적용하였다. 이를 통해 Sand Patch 방법에 대해 반복성과 재현성 관점에서 통계적인 검증을 하였다. 본 논문의 분석결과는 Sand Patch 방법의 측정능력은 매우 미흡하여 포장노면조직 측정데이터를 신뢰하기에는 한계가 있음을 시사하고 있다. 현 상태로는 현장에서 Pass/Fail 정도의 기능 만을 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

평가자들이 예비실험을 통해 측정상황에 적용할 수 있는 기회가 부여된다면 재현성은 다소 나아질 것으로 보인다. 따라서 예비실험을 포함한 사전교육이 필수적이라고 생각되며 측정과정 전체에 대해서도 표준화가 선행되어야 할 것으로 판단된다. 예를 들어, 모래의 종류나 부피 뿐 아니라 모래를 붓고 펴는 요령에 대한 기준확립이 필요하다는 것이다. 아울러 흙손의 사양이나 사용법도 함께 고려하는 것이 좋겠고, 향후 측정결과와 산포를 최소화할 수 있는 측정시스템의 Robust Design에 대해 연구가 필요할 전망이다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부와 교육과학기술부의 제 2단계 산학협력중심대학육성사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

1. 이승훈(2003), 6시그마와 QS9000을 위한 측정시스템분석, 청문각.
2. 이승우(2003), “콘크리트 표면조직의 노후화 및 개선,” 한국도로포장공학회지, 5(1), pp. 10-21.
3. 김남철(2004), 골재노출 콘크리트 포장특성에 관한 연구, 강릉대학교 석사학위논문.



4. ASTM(2001), "Standard Test Method for Measuring Pavement Macrotexture Depth Using a Volumetric Technique," ASTM E965-96.
5. 박성현(2003), 개정판 현대실험계획법, 민영사.
6. MINITAB(2004), MINITAB and USER'S GUIDE, Release 14, Minitab Inc., State College, PA.
7. Montgomery, D. C.(2005), Introduction to Statistical Process Control, Wiley.
8. 이승훈(2006), MINITAB 측정시스템분석, 이레테크.