JOURNAL of the Korean Asphalt Institute Vol. 13, No. 2, 262-268, 2023
https://doi.org/10.22702/jkai.2023.13.2.20

pISSN: 2234-0785
eISSN: 2635-9553

Scientific Paper

마이크로웨이브를 이용한 아스팔트 혼합물 자가회복 특성 실내 연구

김성운[1]* · 김광우[2] · 정운규[3]
[1](주)우행이앤씨 공학박사(이사) , [2]강원대학교 지역건설공학과 공학박사(명예교수), [3](주)화인코왁 대표이사

A study of asphalt mixture self-healing properties by using microwave irradiation in laboratory

Sungun Kim[1]*, Kwangwoo Kim[2] and Unkyu Jeong[3]
[1]Ph.D, Director, WOOHAENG Engineering & Construction Corporation
[2]Professor Emeritus, Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University
[3]Chief Executive Officer, FineKOWAK Corporation

***Corresponding author:** Tel. +82-2-2135-1860, E-mail. sungun2001@hanmail.net

Received: December 3, 2023; **Revised:** December 20, 2023; **Accepted:** December 20, 2023

ABSTRACT

Asphalt has the characteristic of changing phases into solid, viscoelastic, and liquid depending on temperature. Asphalt becomes brittle at low temperatures in the winter, causing cracks, and becomes fluid and deforms at high temperatures in the summer. Asphalt has fluidity as temperature rises and has the property of moving to cracks inside the pavement and sealing. Research on restoring road performance using this characteristic (asphalt self-healing) has been actively conducted. In this study, various tests were conducted to confirm the self-healing properties of asphalt using microwave irradiation in the laboratory. The flexural strength and indirect tensile strength before and after microwave irradiation were compared to analyze the different strength recovery ratio due to microwave irradiation. As a result of the study, it was confirmed that microwave irradiation is effective in recovering the strength of asphalt pavement, and that the strength recovery ratio of asphalt mixtures using SMA mixtures with high asphalt content and materials with heat conduction characteristics was high.

Keywords: Asphalt Self-healing, Hair-line Crack, Microwave Irradiation, Strength Recovery Ratio

1. 서 론

원유(crude oil) 정제 후 잔류물인 아스팔트는 도로포장용 아스팔트 혼합물 제조에 주로 사용되고 일부가 구조물 방수재 등으로 사용되고 있다. 아스팔트는 점탄성을 가지는 재료로 온도에 따라 고체-점탄성체-액체로 상이

© 2023 by Korean Asphalt Institute. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

변하는 특성이 있다. 동절기 저온에서 아스팔트는 취성을 가진 고체 상태로 부러지기(깨지기) 쉽고, 여름철 고온에서 아스팔트는 유동성을 가지며 변형이 쉽게 발생한다. 동절기 저온에서 시차열 수축(differential thermal contraction)에 의한 온도 균열(thermal cracking)과 한여름 소성변형(rutting)은 아스팔트 재료 특성이 대표적으로 나타난 것이다(Hussein et al., 1988; Kim and Hussein, 1997). 또한, 동절기 도로에 발생한 미세한 균열이 여름철 고온 상태에서 봉합되는 현상은 아스팔트의 점탄성 특성을 잘 나타내고 있다(Kim and Kim, 2022).

아스팔트 혼합물은 아스팔트와 골재를 120~180°C 온도 범위에서 가열 혼합하여 제조한다. 이후 건설 현장으로 운반되고 포설 및 다짐 과정으로 아스팔트 포장도로를 시공한다. 유럽에서는 공용 중인 아스팔트 포장도로에 발생한 미세균열(hairline crack)을 봉합할 목적으로 포장된 도로의 아스팔트에 유동성(fluidity)을 부여하기 위한 연구를 수행하였다(Garcia, 2012; Tabakovic and Schlangen, 2015). 아스팔트 자가회복 특성에 관한 연구는 유도가열(induction heat) 방식, 마이크로웨이브 방사(microwave irradiation heating) 방식, 재생첨가제 캡슐(encapsulated rejuvenator) 방식 등이 있으며(Liu et al., 2010; Shen et al., 2010; Norambuena and Garcia, 2016; Norambuena and Gonzalez, 2017; Pan et al., 2018; Yalcin et al., 2018), 기존 포장체 내의 아스팔트 점도를 낮추어 보다 높은 유동성을 부여하는 방향으로 진행되었다.

선행연구 결과에 따르면 외부에서 물리적인 작용을 가하여 아스팔트에 유동성을 부여하면 아스팔트는 모세관 현상(capillary) 또는 외부 다짐 압력에 의해서 균열부로 유동하여 균열을 봉합하는 자가회복(self-healing) 특성을 나타냄을 확인하였다. 이러한 아스팔트 자가 회복에 의한 성능(performance) 회복은 아스팔트 공시체의 휨강도(S_t) 및 간접인장강도(ITS) 회복률(S_t recovery ratio, ITS recovery ratio)을 측정하여 확인하였다.

본 연구에서는 마이크로웨이브 조사 방식을 적용한 아스팔트 자가회복 특성을 실험실에서 확인하고자 하였다. 실험실 스케일의 마이크로웨이브 조사 장치를 개발하였고, 빔 및 원형의 아스팔트 공시체에 마이크로웨이브 조사 장치를 사용하여 마이크로웨이브를 아스팔트 공시체 파괴 단면에 조사하였다. 강도시험-마이크로웨이브 조사-강도시험의 과정으로 저온(-10°C) 휨강도 및 간접인장강도(25°C) 시험을 수행하여 휨강도 및 간접인장강도 회복률(recovery ratio: RR)을 분석하였다.

2. 마이크로웨이브 조사 장치

본 연구를 수행하기 위해서 마이크로웨이브(MW) 조사 장치를 제작하였다. 마이크로웨이브 조사 장치의 제원은 Fig. 1에서 보여지는 것처럼 3 kW 출력, 2.45 GHz의 파장을 가지는 장치로 전력 공급부를 포함하는 콘트롤 박스, 자전관(Magnetron), 방사선 분산 팬(Radiation stir fan), 오일 연무기(Oil mist ejector), 방사 공간(Radiation cavity), 금속 도파관(Metal waveguide) 및 절연벽(Cavity wall insulation)으로 구성되었다.

Fig. 1의 마이크로웨이브 조사 장치를 사용하여 최적의 마이크로웨이브 조사 시간을 결정하기 위한 사전실험을 수행하였다. 150*150 mm(지름*높이)의 원형공시체를 제조하고, 상부로부터 25 mm 간격으로 온도센서를 매설하였다(Fig. 2). 이후 마이크로웨이브를 60~270초(second) 동안 조사하여 공시체의 깊이별 온도를 측정하였다. 아스팔트 포장 시공 과정 중 3차 다짐 온도 범위인 60~100°C 온도(MOLIT, 2021)를 만족하는 MW 조사 시간을 결정하였다(Fig. 3).

Fig. 1. Lab scale MW irradiation device

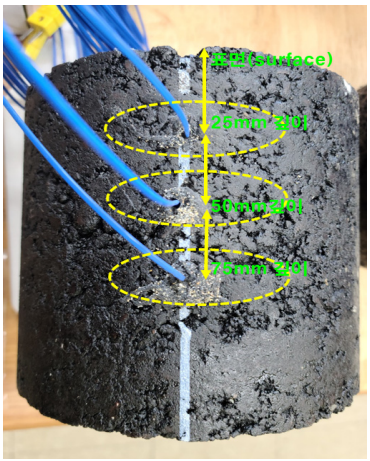

Fig. 2. Temp. sensors by sample depth

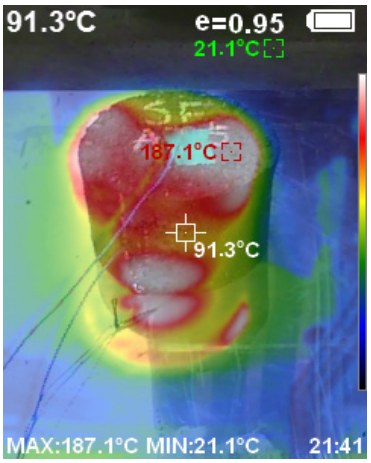

Fig. 3. Temp. by MW irradiation time as sample depth

3. 재료 및 방법

3.1 사용재료

본 연구에서 빔 및 원형의 아스팔트 공시체를 제조하였다. 시험에 사용된 아스팔트 혼합물은 화강암 골재를 사용한 밀입도 혼합물, RAP(reclaimed asphalt pavement)을 각각 30, 50% 사용한 순환 아스팔트 혼합물, 슬래그 골재를 사용한 슬래그 재활용 개질 아스팔트 혼합물을 국토교통부 WC-2 입도를 적용하여 제조하였다. 또한 고속도로 현장에서 공용 중인 SMA(stone mastic asphalt) 코어를 채취하여 MW 조사에 따른 회복률 실험에 사용하였다.

3.2 실험방법

3.2.1 파괴시험

아스팔트 빔 공시체를 -10°C 온도에서 6시간 동안 양생 후 꺼내어 신속하게 3점 휨시험을 수행하였다(Fig. 4(b) and (c)). 실내에서 제작한 원형공시체와 현장에서 채취한 현장코어 공시체를 25°C 오븐에서 24시간 동안 보관 후 꺼내어 간접인장강도 시험(KS F 2382)을 수행하였다. Fig. 5는 중앙점 재하 방식 3점 휨시험과 간접인장강도 시험 모습이다.

3.2.2 MW 조사(Irradiation)

3점 휨시험과 간접인장강도 시험 후 파괴된 공시체(균열 발생 및 2조각으로 파괴)의 파괴 단면을 이어놓은 상태에서 실험 중 공시체 유동을 방지하기 위해 공시체 양단을 구속한 상태로 MW 조사 장치의 방사 공간에 위치시키고 MW를 150초 동안 조사하였다.

(a) (b) (c)

Fig. 4. Test samples: (a) Beam specimens, (b) Cylindrical specimens manufactured in lab, and (c) Field core specimens

(a) (b) (c)

Fig. 5. (a) 3-point bending test at -10℃, (b) indirect tensile strength at 25℃, and (c) Combined sample for MW irradiation

3.2.3 회복률(Recovery ratio)

파괴된 공시체에 MW 조사 후 24시간 양생하고 -10°C에서 3점휨 시험과 25°C에서 간접인장강도 시험을 수행하였다. MW 조사 전후의 강도 비(strength ratio)를 계산하여 휨강도 회복률 및 간접인장강도 회복률을 각각 계산하여 MW 조사가 포장체의 휨 및 인장 성능 회복에 미치는 영향에 대하여 분석하였다.

4. 시험결과 및 고찰

4.1 S_t 회복률

-10°C에서 3점 휨시험 결과 Fig. 6과 같이 RAP 함량이 0%(control)에서 30, 50%로 증가하면서 휨강도(S_t)는

각각 8.8, 8.1, 7.3 MPa로 감소하였다. 휨시험 종료 후 공시체 파괴 단면에 MW를 조사하고 양생 후 휨시험 결과 휨강도는 3.5 MPa에서 1.6 MPa로 측정되었다. MW 조사 전·후 휨강도를 비로 나타낸 휨강도 회복률은 RAP 함량이 0, 30, 50%일 때 각각 40.3, 43.4, 22.5%의 회복률을 보였다. 이는 공시체 파괴 단면에 MW를 조사하여 파괴전 공시체의 40% 내외의 휨강도를 가지도록 회복시키는 것을 확인할 수 있었다.

RAP 함량이 증가하면서 저온 휨강도는 감소하여 50% RAP을 사용한 control 혼합물의 88.6%(7.5 MPa)를 나타냈다. MW 조사 후 휨강도는 같은 경향을 보이며 RAP 함량이 0에서 30, 50%일 때 각각 40.3, 43.4, 22.5%의 휨강도 회복률을 보였다. RAP 함량이 증가하여 30%를 초과하면 휨강도 회복률이 급격히 낮아지는 것으로 판단되었다. RAP이 포함된 아스팔트 혼합물은 RAP에 포함된 노화된 바인더의 영향으로 공시체 내 아스팔트에 유동성 부여 및 회복 능력이 일반(control) 혼합물에 비해 감소하는 것으로 판단되었다.

4.2 ITS 회복률

Fig. 7은 실내에서 제조한 공시체의 ITS, 파괴 후 균열단면에 MW 조사 후 ITS 및 ITS 회복률을 나타낸 것이다. 일반 아스팔트 공시체의 회복률(44%)에 비하여 개질 아스팔트 공시체의 ITS 회복률(평균 63.5%)이 44% 높게 측정되었다. 나아가 PG(performance grade) 76-22등급 개질 아스팔트 혼합물의 경우 SBS(styrene butadiene sytrene) 개질 아스팔트에 비하여 슬래그 골재와 제강슬래그 분말을 사용한 개질 아스팔트 혼합물의 회복률이 15.25% 높게 측정되었다. 이는 슬래그 골재(분말)에 포함된 유전자 성분이 열전도 효율을 증가시켜 아스팔트가 공시체 내 균열로 잘 이동하여 균열 봉합하는 효과가 나타난 것으로 판단되었다.

Fig. 8은 현장에서 채취한 SMA 13, 10 mm 코어 공시체의 ITS, MW 조사 후 ITS 및 ITS 회복률을 나타낸 것이다. SMA 혼합물은 구조 특성상 밀입도(일반 및 개질) 혼합물에 비하여 높은 아스팔트 함량을 가지며, 많은 아스팔트는 MW 조사 시 균열 봉합에 더 효과적인 것을 알 수 있다. 즉, SMA 코어의 ITS 회복률 평균은 76%로 개질 아스팔트 혼합물 평균 63.5%에 비하여 20% 정도 높은 것으로 측정되었다.

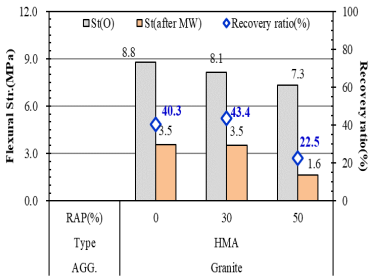

Fig. 6. S_t and S_t recovery ratio (%) by RAP content

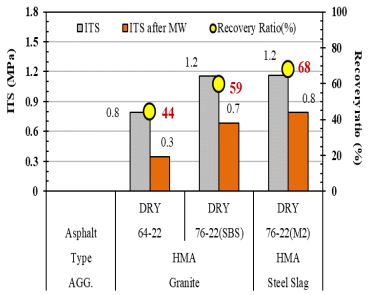

Fig. 7. ITS and ITS recovery ratio (%) by mixtures

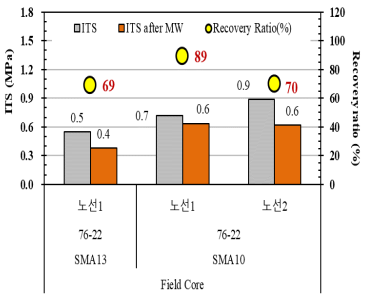

Fig. 8. ITS and ITS recovery ratio (%) of field cores

5. 결과 요약 및 결론

본 연구에서 마이크로웨이브 조사 장치를 개발하고, 이를 사용하여 아스팔트 공시체의 자가회복 특성에 관한 실험실 연구를 진행하였다. 일반 및 개질 밀입도 혼합물, RAP이 포함된 순환 아스팔트 혼합물, SMA 현장 코어 공시체에 대하여 저온 휨강도 및 상온 간접인장강도 시험을 수행하여 마이크로웨이브 조사에 다른 강도 회복률을 분석하여 다음과 같이 요약하였다.

1. 본 연구를 통해 개발한 장치를 사용하여 아스팔트 공시체 파괴 단면에 마이크로웨이브를 조사하면 아스팔트 공시체의 균열단면을 복구시켜 휨강도(일반 아스팔트 공시체 평균 회복률 40%) 및 간접인장강도(개질 아스팔트 공시체 평균 회복률 71%)를 회복시키는 것을 확인하였다.
2. 마이크로웨이브 조사 방식의 아스팔트 자가 회복 특성은 RAP을 0%(일반), 30% 사용한 순환 아스팔트 혼합물, 개질 아스팔트 혼합물, SMA 혼합물 모두 효과가 있음을 확인하였고, 높은 아스팔트 함량을 가지는 SMA 혼합물 강도 회복률이 우수하게 나타났다.
3. 본 연구는 제한된 출력을 가진 실험실 규모 장치 성능 한계와 한정된 실험 재료에 관한 결과를 나타낸 것이다. 향후, 장치의 scale-up과 다양한 혼합물 및 도로 상황에 관한 추가 연구가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단의 연구(NRF-2021R1I1A1A01060422) 지원으로 이루어진 것입니다.

참고문헌

Tabakovic, A. and Schlangen, E. (2015). Self-Healing Technology for Asphalt Pavements. Advances in Polymer Science, Chapter: Self-Healing Technology for Asphalt Pavements. DOI: 10.1007/12_2015_335

Garcia, A. (2012). “Self-healing of open cracks in asphalt mastic”, Fuel, 93, pp. 264-272. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.09.009

Norambuena, J. and Gonzalez, I. (2017). “Influence of the Microwave Heating Time on the Self-Healing Properties of Asphalt Mixtures”, Applied sciences, 7(10). DOI: 10.3390/app7101076

Kim, K.W. and Hussein, E. (1997). “Variation of fracture toughness of asphalt concrete under low temperatures”, Construction and Building Materials, 11(7-8), pp. 403-411. https://doi.org/10.1016/S0950-0618(97)00030-5

Kim, S. and Kim, K.W. (2022). Self-Healing Property of Asphalt Concrete by Microwave Radiation. Journal of Recycle Construction Resources, Spring Conference, Sonocalm, Goseong, April 13-15.

Liu, Q., Schlangen, E., Ven, M.V. and Garcia, A. (2010). “Healing of Porous Asphalt Concrete via Induction Heating”, Road Materials and Pavement Design, 11(sup1), pp. 527-542. DOI: 10.1080/14680629.2010.9690345

MOLIT (2021). “Guideline for construction of asphalt concrete pavement”, Korea Institute of Civil Engineering

and Building Technology (in Korean).

Norambuena-Contreras, J. and García, A. (2016). Self-healing of asphalt mixture by microwave and induction heating. Materials Science, Materials & Design. DOI:10.1016/J.MATDES.2016.05.095

Pan, C., Tang, P., Riara, M., Mo, L., Li, M. and Guo, M. (2018). "Effect of Healing Agents on Crack Healing of Asphalt and Asphalt Mortar", Materials, 11(8), p. 1373. DOI: 10.3390/ma11081373

Shen, S., Chiu, H.M. and Huang, H. (2010). "Characterization of fatigue and healing in asphalt binders", Journal of Materials in Civil Engineering, 22(9), pp. 846-852. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000080

Yalcin, E., Norambuena-Contreras, J., Garcia, A. and Yilmaz, M. (2018) Self-healing methods used in asphalt mixtures. Conference proceedings, 20th International Conference on Pavement Engineering, Paris, France Mar. 15-16, 20(3) Part VIII.