

# 마이크로웨이브를 이용한 콘크리트 잔골재 표면수율 측정 자동화

최영철 · 이봉춘 · 문규돈 · 손영정<sup>†</sup>

한국건설생활환경시험연구원 선행기술팀

(2011. 9. 6. 접수 / 2012. 1. 12. 채택)

## Microwave Moisture Measurement of Fine Aggregate in RMC Industry

Young-Choel Choi · Bong-Chun Lee · Gyu-Don Moon · Young-Jung Son<sup>†</sup>

Advanced Technology Team, Korea Conformity Laboratories

(Received September 6, 2011 / Accepted January 12, 2012)

**Abstract :** Ready-mixed concrete(RMC) has been a major construction materials for infrastructures. However, RMC with poor quality is reported to be social issue since it directly user's safety and convenience. Because the properties of concrete as a construction material are greatly influenced by the variation of water content, to control water accurately is the most efficient method for the quality control in RMC industry. In this study, the automatic measurement technology of fine aggregate was developed by using the microwave moisture measurement. For the various conditions of fine aggregate such as moisture, temperature and pressure, the calibration curve of moisture measurement was obtained by using oven-dry method. From the infield and outfield test, it can be obtained that the accuracy of microwave moisture measurement is very high and the automatic system of microwave moisture measurement is very convenient and useful for quality control in RMC Industry.

**Key Words :** microwave, moisture measurement, ready mixed concrete, quality control

### 1. 서론

레디믹스트 콘크리트는 국가기반시설물의 인프라 구축을 위해 중요한 역할을 담당하는 재료로서 2008년도 레미콘 출하실적이 8조 1천억원에 달하는 거대한 시장규모를 가지고 있으나, 불량레미콘 납품과 같은 지속적인 문제점은 국민의 안전과 직결되어 사회적으로 이슈화 되고 있다.

레디믹스트 콘크리트 공장 및 콘크리트 타설 현장에서의 골재 수분관리는 정확한 배합을 통한 콘크리트 품질의 변동성을 최소화하기 위해 꼭 필요한 기술이다. 이러한 골재 수분관리는 골재의 저장, 이동 및 혼합 시 골재가 함유하고 있는 수분을 자동으로 측정할 수 있는 센서를 이용함으로써 콘크리트 강도 등의 품질에 영향이 큰 단위수량, 즉 물-시멘트 비(W/C)의 변동 폭을 크게 줄일 수 있다.

골재의 표면수는 콘크리트의 시방배합을 현장배합으로 변경하는 과정 중 레미콘의 품질변동에 지대한 영향을 미치는 단위수량과 밀접한 관계가 있으

며, 저장되는 상태에 따라 표면수율의 값은 2~9% (Fig. 1)<sup>6)</sup>의 변동 폭을 가지는 것으로 보고되고 있다. 따라서 품질변동이 적은 레디믹스트 콘크리트를 제조하기 위해서는 골재의 표면수율을 주기적으로 측정하여 배합비를 보정하여야 한다. 하지만 건설 현장에서는 수동으로 측정하여야 함에 따라 인력 부족 및 작업의 번거로움으로 매년 측정이 곤란한 것이 현실이다.

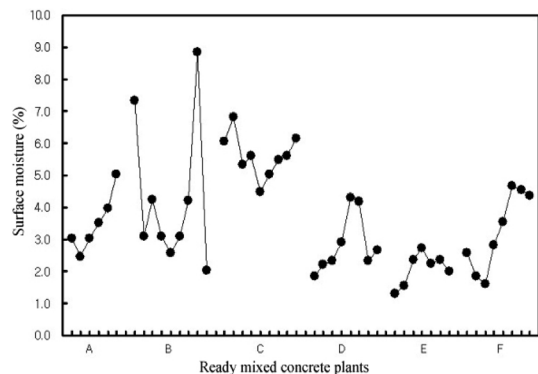


Fig. 1. Results of moisture measurement in RMC plants.

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
sonyj@kcl.re.kr

따라서, 레미콘 품질관리의 신뢰성을 구조적으로 향상시키기 위해 자동화된 콘크리트 골재 표면수를 측정시스템의 개발이 요구된다.

본 연구는 마이크로파를 이용하여 골재가 함유하고 있는 수분량을 정확히 측정할 수 있는 측정 장치 개발을 목적으로 하고 있다. 구체적으로 발진위상을 달리하는 다중 위상차 마이크로파를 송신파로 이용하여 측정대상 시료에 조사하고, 측정대상 시료를 통과하여 수신된 수신파에서의 진폭을 파악함으로써 측정대상 시료의 수분량을 측정하게 되는 다중 위상차 마이크로파를 이용한 수분량 측정장치를 개발하였으며, 다양한 상태의 콘크리트 잔골재에 적용하여 그 정확성을 검증하였다.

## 2. 골재 표면수를 측정센서

### 2.1. 측정원리

골재 수분량 측정을 위한 마이크로파는 기본적으로 대상 물질을 투과할 수 있어야 하며, 먼지가 있는 환경 및 골재의 색상변화에 영향을 적게 받아야 한다. 일반적으로 콘크리트용 골재의 수분 측정을 위해 저전력 마이크로파(low power microwave)가 이용되고 있으며, 수분량 측정을 위해 주파수 이동과 진폭 감쇄를 이용한 아날로그식(analogue) 마이크로파 센서를 주로 이용했었다. 이러한 조합은 싱글 아날로그식 응답(single analogue response)을 측정하기 때문에 주파수 이동과 진폭 감쇄는 분리될 수 없다. 이러한 마이크로파를 대상물질에 투과하여 수신하게 되면 주파수 및 파의 진폭에 변화가 생기게 된다. 주파수의 이동은 수분의 변화와 직접적으로 관련이 있으며, 진폭은 물질의 밀도와 상관계수가 있다.

1980년대에 개발된 디지털식 마이크로파를 이용한 수분 측정센서는 정확한 디지털 기술을 이용하여 측정값의 신뢰도를 높였으며 측정 가능한 수분의 범위가 확대되었다. 이러한 디지털식 마이크로파 센서는 수신 시그널의 주파수와 진폭 모두를 측정 후 수학적 공식에 의해 주파수 변화, 진폭감소량 및 위상변화 등을 조합하여 사용자에게 측정결과 모형을 제공한다. 이러한 측정결과와 전기적 신호체계는 대부분 선형 또는 비선형 값을 출력하며, 재료들이 갖는 수분 양에 따라 보정된다.

마이크로파(microwave)는 대상물질의 수분정도에 따라 수신되는 파의 특성이 달라지게 된다. Fig. 2는 사인파(sine wave) 형태의 마이크로파를 송신파(굵

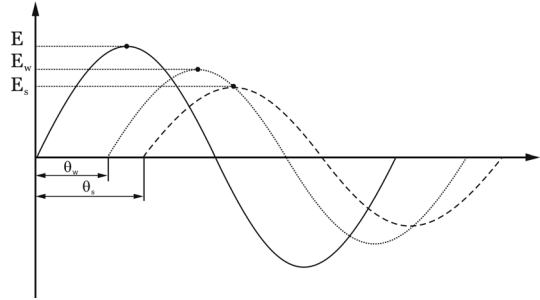


Fig. 2. Pattern of microwave transmitted and received impulse.

은 실선)로 이용하여 완전 건조한 시료를 통과한 후 수신한 수신파(가는 점선)와 일정한 수분을 포함한 시료를 통과한 후 수신한 시료의 수신파(굵은 점선)의 관계를 보여주는 그림이다. 사인파 형태의 송신파를 수분량이 거의 없는 완전건조 상태의 시료에 투과하게 되면 시료를 통과하여 수신한 수신파는  $\theta_w$ 의 위상차를 가지게 되고, 진폭도 감쇄가 일어나서 송신파의 진폭  $E$ 보다 작은  $E_w$ 의 진폭을 가지게 된다. 일정 수분량을 가지는 시료의 경우, 시료에 포함되어 있는 수분에 의해 마이크로파의 진행에 장애가 발생하기 때문에 시료를 통과하여 수신한 수신파는 완전건조 상태의 시료에서의 위상차  $\theta_w$ 보다 더 큰 위상차  $\theta_s$ 를 가지게 되며, 진폭 역시 더 작아진  $E_s$ 의 진폭을 가지게 된다.

일반적으로 마이크로파를 수분이 거의 없는 완전 건조된 골재 상태에 투과한 후의 수신파의 진폭  $E_w$ 와 소정의 수분을 함유한 골재 상태의 수신파의 진폭  $E_s$ 의 차이  $\Delta E$ 는 시료의 수분량과 일정한 관계를 가지게 되며, 이는 해당 골재의 재료 물성처럼 고유특성으로 구분될 수 있다.

상기의 이러한 수분 함유정도에 따른 마이크로파의 특성을 이용하면, 골재 등의 물질이 함유하고 있는 수분의 양을 정량할 수 있다. 하지만 일반적인 마이크로파를 이용하면 수분의 정도에 따라 진폭감소 폭 등 마이크로파의 기본적인 특성 손실에 의해 측정의 정확도를 기할 수 없기에 본 연구에서는 다중 위상차 마이크로파를 이용하였다.

시료의 수분량이 커질수록 마이크로파의 진행에 대한 방해가 더 심해지므로, 시료를 통과한 수신파의 진폭은 시료의 수분량에 비례하여 더 감소하게 된다. 즉, 시료의 수분량은 완전건조 상태에서 측정된 수신파에서의 진폭  $E_w$ 와 시료의 수신파에서의 진폭  $E_s$ 의 차이에 비례하며 식 (1)과 같다.

$$W = k \times \Delta E \quad (1)$$

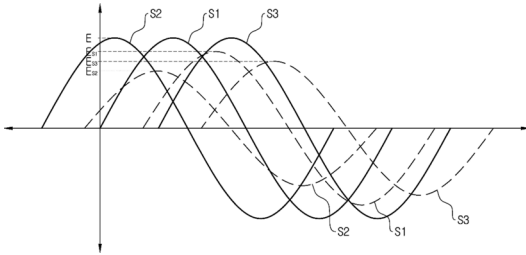


Fig. 3. Multi-phase microwave.

여기서,  $W$ 는 수분량이며,  $k$ 는 비례상수,  $\Delta E$ 는 순수 물의 수신파에서의 진폭  $E_w$ 에서 시료의 수신파에서의 진폭  $E_s$ 를 뺀 값이다.

완전 건조된 골재와 다양한 종류의 수분량을 가진 골재를 대상으로 진폭과 위상, 그리고 파장을 알고 있는 송신파를 투과하여 그 수신파의 진폭, 위상, 파장변화를 측정하여 해당 수분량과 진폭 변화량 간의 관계를 규정하는 비례상수  $k$ (식 1)를 산정할 수 있다. 이를 통해 실제 측정대상 시료에 마이크로파를 송신파로서 조사하고 시료를 통과한 수신파를 수신하여 진폭 변화를 산정하고 이미 구해놓은 비례상수  $k$ 를 이용하여 실제 측정대상 시료의 수분량을 알 수 있다.

그런데, 실제 시료를 통과한 수신파에서의 진폭 변화에 영향을 주는 원인으로는 시료에 포함된 수분 이외에도 시료의 물리적인 상태가 있다. 예를 들어, 시료에 기포가 존재하는 등의 불완전한 상태에 의해 시료를 통과한 수신파의 진폭이 감소하게 될 수도 있다. 수분의 정도에 따른 마이크로파의 기본적인 특성 손실에 의한 측정오차를 최소화하기 위해 본 연구에서는 발진 위상이 서로 다른 복수개의 마이크로파로 이루어진 다중 위상차 마이크로파를 송신파로 이용하였다(Fig. 3). 이는 수분 통과 시의 마이크로파 손실 특성을 다수 위상차에 대해서 평균적으로 고려한다. 따라서 다양한 위상차에 의한

마이크로파의 기본특성 손실을 모두 고려할 수 있기 때문에 손실 노이즈를 최대한 제거하여 수분량 측정의 정확성을 높일 수 있다.

## 2.2. 측정 센서의 교정

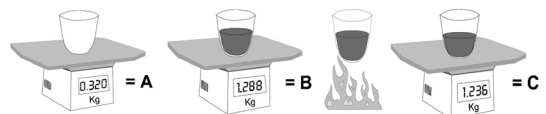
콘크리트 산업에서 골재는 표면건조포화상태(saturated surface dry, SSD)를 기준으로 계량을 하게 된다. 하지만 현장 및 실험실에서 표면건조포화상태로의 골재 보관 및 저장에 상당히 어렵기 때문에 콘크리트용 골재는 대부분 표면에 수분을 함유하게 된다.

이는 단위수량의 변동성을 초래하기 때문에 콘크리트의 신뢰성 있는 품질관리를 위해서는 골재의 함수율을 정확한 측정이 필요하며, 이를 위해서는 수분량을 알고 있는 표준대상 시료와 이를 측정한 센서의 결과 값에 의한 교정이 필수적이다.

골재의 수분은 골재 내부에 흡수된 부분과 골재 표면에 응축된 부분으로 구분 할 수 있기 때문에 골재의 표면의 수분의 양을 측정하기 위해서는 오븐 건조를 통해 전체 골재가 함유하고 있는 수분의 양을 측정하고 골재 자체의 함수율(SSD 상태)을 측정하여 다음과 같이 산정할 수 있다.

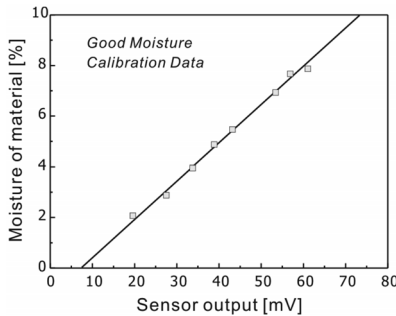
$$w_t(\%) - w_{abs}(\%) = w_{free}(\%) \quad (2)$$

여기서,  $w_t$ 는 전체수분량,  $w_{abs}$ 는 골재 흡수율,  $w_{free}$ 는 전체수분량에서 골재 흡수율을 뺀 값으로 골재의 잉여수이다.

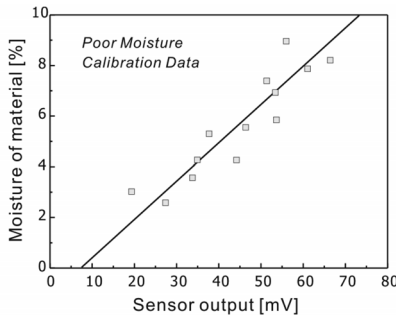


$$\text{Moisture}(\%) = \frac{\text{Water in material(B-C)}}{\text{Dry weight of material(C-A)}} \times 100$$

Fig. 4. Moisture measurement by oven-dry method.



(a) good



(b) bad

Fig. 5. Examples of calibration curve.

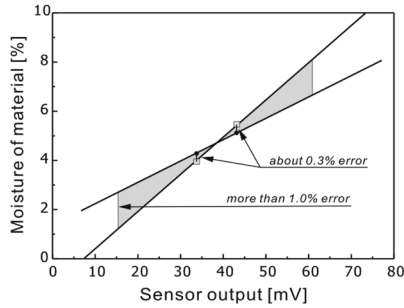


Fig. 6. Error due to calibration curve.

Fig. 5(a)와 같이 검량선의 교정점들이 선형적으로 그 분산도가 적은 경우 측정센서를 이용하여 골재의 표면수율 측정 정확도가 높아지며, (b)의 검량선 사용 시 수분 측정센서의 결과 값에 대한 신뢰성이 교정 점들의 큰 분산도만큼 떨어지게 된다. 측정하고자 하는 물질의 수분량을 측정할 때 센서의 출력 값의 범위가 큰 경우가 작은 경우보다 검량선 작성에 골재의 수분량 측정 오차가 작다. Fig. 6(a)의 경우 실제 약 0.3% 정도의 수분량 차이를 보이지만 센서 출력 값이 10~20 정도에서는 약 1%의 큰 오차를 보일 수 있다. 이는 교정 시 측정하고자 하는 골재의 수분량 범위를 넓게 하는 것이 측정센서의 정밀도를 높일 수 있다는 것을 알 수 있다.

### 3. 실험계획 및 방법

레디믹스트콘크리트 플랜트 현장의 골재의 저장 상태에 따라 변동되는 함수율을 검토하기 위하여 개발된 다중 위상차 마이크로파 센서의 출력 값과 함수율 관계를 확인하고, 측정위치에서의 온도 변화와 골재에 가해지는 압력의 정도를 측정항목으로 하였으며, Mock-up 시험을 하였다.

골재는 레미콘 플랜트에서 사용되는 일반적인 잔골재를 사용하였으며, Fig. 7은 본 연구개발을 통해 개발된 측정센서 및 장치를 나타내고 있다.

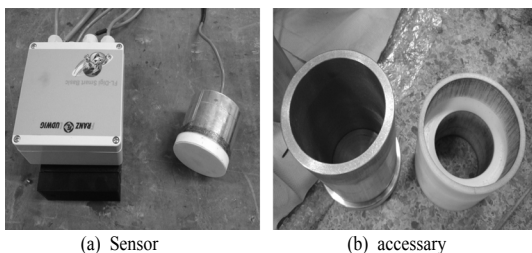


Fig. 7. Sensor and accessory of moisture measurement.

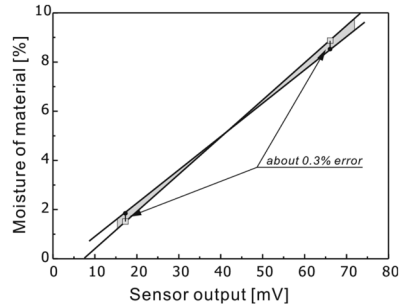


Fig. 8. Mock-up test of moisture measurement.

잔골재의 함수율을 10% 이내의 0, 0.2, 1, 1.2, 2, 2.5, 3, 5, 7, 7.5 및 10%의 11 수준으로 시료를 준비하여 이를 개발된 측정센서를 사용한 함수율 측정 값과 오븐 건조에 의한 전체 수분 함수율 및 KS F 2504에 의한 골재 함수율(SSD 상태의 골재 수분율) 측정 값의 관계를 검토하였다.

다중 위상차 마이크로파 센서 측정 시 온도에 의한 영향을 검토하기 위해 수분 함유량이 0, 1.2, 2, 2.5, 5, 7.5 및 10%의 7수준, 잔골재의 온도를 10℃, 20℃, 30℃의 3수준으로 하여 보관하고 측정 센서 및 장치를 각각의 온도수준의 환경으로 하여 시험하였다.

또한, 단위 부피 당 포함하는 골재의 골재량 및 표면수량의 다짐정도에 따른 영향을 살펴보기 위해, 골재에 일정 중량으로 가압하여 다짐할 수 있는 장비를 이용하여 다양한 압력조건하에서 함수율이 약 2%, 3% 인 잔골재에 대해 시험하였다.

개발된 수분측정 센서를 실제 현장조건에서 검증하기 위해 Fig. 8과 같이 Mock-up 시험 장치를 제작하여 레미콘 현장의 골재 호퍼 내 측정 센서 부착 위치를 고려하여 마이크로파 센서 측정값과 건조 방법에 의한 잔골재의 함수율을 비교하였다.

### 4. 결과 및 고찰

#### 4.1. 표면수율 추정식 도출

Table 1. Oven-dry test results of water content

	Before oven-dry (g)	After oven-dry (g)	water content (%)
#1	500.3	500.3	0
#2	501.2	500.2	0.2
#3	498.5	493.6	1
#4	499	493.1	1.2
#5	501.2	491.4	2
#6	503	490.7	2.5
#7	495.2	480.8	3
#8	499.4	475.6	5
#9	502.5	469.6	7
#10	497.8	463.1	7.5
#11	502.1	456.5	10

$$H1(w_r, \%) = 8.3395 \times (\text{Sensor output}) - 10.146 \quad (3)$$

$$H2(w_f, \%) = 8.3395 \times (\text{Sensor output}) - 11.716 \quad (4)$$

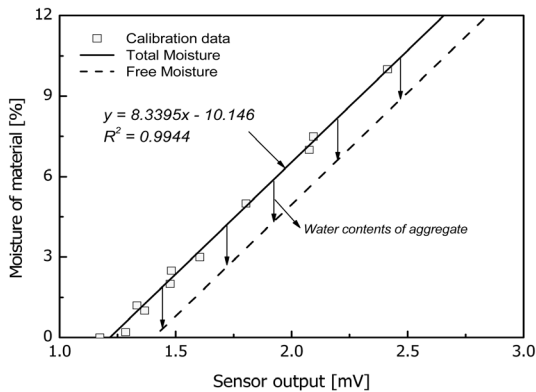


Fig. 9. Calibration curve of the developed sensor.

개발된 다중 위상차 마이크로파 센서를 콘크리트용 골재의 함수율 측정에 적용하기 위해서는 이들 시료에 대한 오븐 건조에 의한 전체 수분 함수율 및 KS F 2504에 의한 골재 흡수율(SSD 상태의 골재 수분율)을 측정하여야 한다. 추정식 도출 시료의 수분함유율은 Table 1과 같으며 함수율 측정결과는 1.57%이다.

개발된 측정센서를 이용한 결과(Table 1)를 그래프로 나타내면 Fig. 9와 같다. 측정 센서의 출력 값과 시료의 수분함유량 관계는 선형적이며 측정회귀식과 측정데이터와의 부합성은 상당히 높은 것으로 나타났다.

#### 4.2. 온도에 의한 영향

콘크리트 배합에 적용되는 골재의 저장은 보통

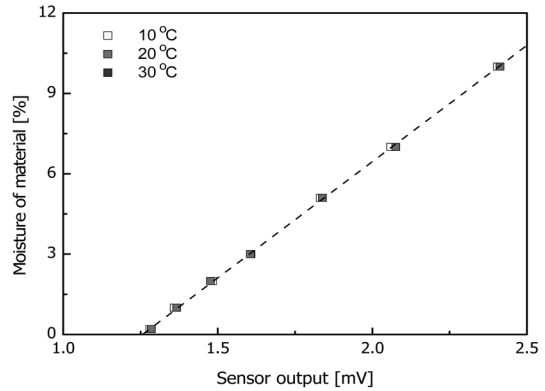


Fig. 10. Temperature effect on the sensor values.

현장에서 일정한 온도로 보관되기 힘들다. 따라서 사계절이 뚜렷한 우리나라의 경우 골재 표면수율 자동측정시스템을 적용하기 위해서는 온도변화에 따른 센서의 영향을 검토는 필수적이다. 이러한 센서의 온도에 의한 영향을 검토하기 위해 수분함유량이 다른 7종류의 골재를 밀봉하고 10°C, 20°C, 30°C에 보관한 후 개발센서로 수분량을 측정하였다.

Fig. 10에서 알 수 있듯이 개발된 센서의 골재의 수분량에 대한 온도의 영향은 무시할 수 있는 것으로 판단된다.

#### 4.3. 압력에 의한 영향

골재의 다짐정도에 따라 단위 부피 당 포함하는 골재량, 수분량 및 기포의 양이 달라 질 수 있기 때문에 이러한 점을 검토하여야 한다.

다짐정도에 따른 골재의 함수율 측정영향은 Fig. 11에서 보는 바와 같이 다짐 압력이 증가할수록 떡 함수 형태로 증가하는 것을 알 수 있었다. 이는 다짐정도에 따른 골재의 단위부피당 기포 및 수분의 분포에 변화가 생겨 발생한 것으로 판단된다. 이러한 점은 추후 현장의 사일로, 컨베이어벨트 등에 설치 시 현장 조건에 맞는 압력조건하에서의 검량선을 작성을 통한 교정작업이 센서의 신뢰성을 높일 수 있다.

#### 4.4. Mock-up 시험

잔골재의 수분조건을 달리하기 위해 물을 추가하여 수분정도를 세분화하여 시험에 사용하였다. 잔골재를 호퍼에 채우고 측정하였으며, 측정 직후 호퍼 내 잔골재를 채취하여 함수율 및 표면수율을 시험하

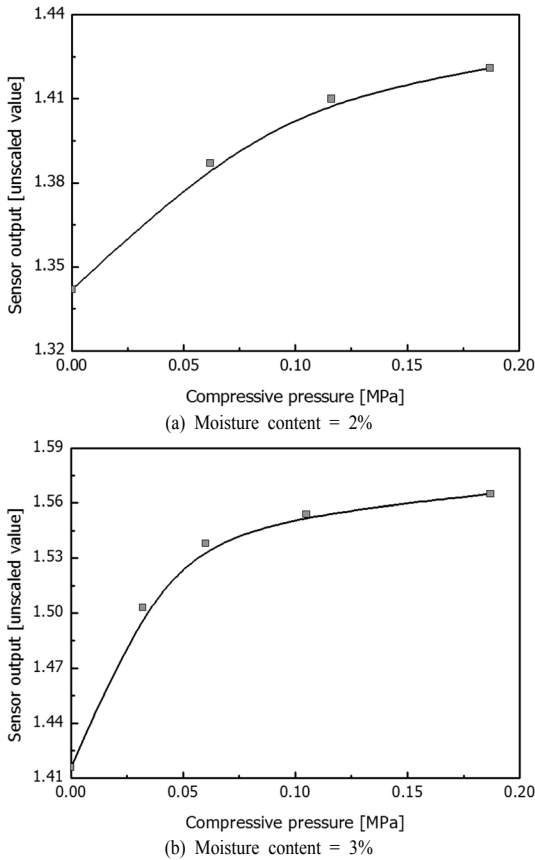


Fig. 11. Effect of compaction on the moisture content.

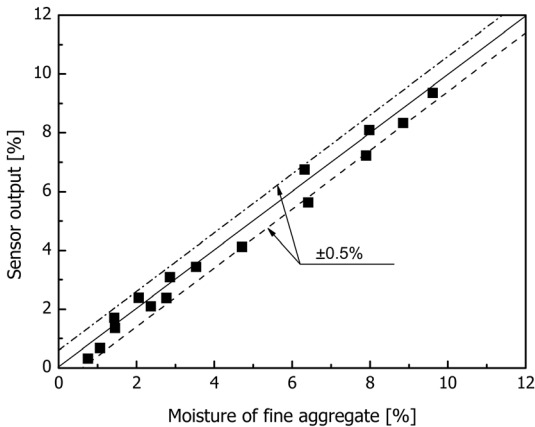


Fig. 12. Mock-up test of moisture measurement.

였다. 시험 결과는 Fig. 12에 나타내었다.

실제 레디믹스트 콘크리트 현장에서의 골재 저장 환경을 묘사한 상태에서 개발된 센서의 현장적용성을 검토한 결과 Fig. 12에서 알 수 있듯이 개발된 골재의 수분측정 센서는 골재의 수분량을  $\pm 0.5\%$  이

내로 정확히 측정하는 것으로 나타났다. 아직 현장이나 시방서에 이러한 측정오차에 대한 기준은 없지만 Fig. 1의 수분 편차 수준을 고려한다면, 실제 건설현장에 적용할 수 있는 가능성이 상당히 크다고 할 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 레디믹스트 콘크리트 플랜트에서 골재의 표면수율을 자동적으로 측정할 수 있는 마이크로웨이브 측정센서를 개발하였으며, 그 성능을 다양한 실험을 통해서 비교 검증하였다. 측정 센서의 개발 및 실제 현장 적용성을 살펴 본 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 마이크로파의 출력 및 신호방식을 결정을 통한 전기적 신호값과 수분의 관계식을 평가하여 도출한 표면수율 추정 식은 신뢰도가 상당히 높은 것으로 나타났다.
- 2) 센서 설치 방식에 따른 기구적 설계를 검토하여 센서 모듈 및 제어부 설계를 통한 표면수율 측정 시스템을 개발하였다.
- 3) 마이크로웨이브를 이용한 골재의 표면수율 측정센서에 대한 온도 및 압력(골재 다짐정도)에 대한 영향을 검토한 결과, 검량선 작성 시 압력에 대한 영향은 고려할 필요가 있으나 온도 변동성은 크지 않은 것으로 나타났다.
- 4) 실제 현장조건을 고려한 Mock-up 시험 결과, 개발된 골재의 표면수율 측정센서의 정확성은 신뢰할 수준으로 나타났으며, 건설현장의 콘크리트 품질 관리에 크게 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

**감사의 글 :** 이 논문은 “레미콘 생산품질관리 자동화시스템 개발”(과제번호 : 10기술혁신H02)의 일환으로 국토해양부 한국건설교통기술평가원 건설기술혁신사업의 연구비 지원에 의해 수행된 연구임.

## 참고문헌

- 1) Holger Thomas, “Moisture measurement in compound feed production”, Kraftfutter Feed Magazine 7/8, 2001.
- 2) Rolf Laffan, “Water water everywhere”, Concrete Engineering International May/June, 1998.
- 3) Rolf Laffan, “Devrlpments in digital microwave te-

- chnology for moisture measurement”, Concrete Technology February, pp. 13~14, 2003.
- 4) Melany George, “Microwave moisture measurement”, Grain Feed milling technology, January, pp. 14~16, 2008.
  - 5) Bogdan CAZACLIU, “In-mixer Measurements to describe the mixture kinetics during concrete mixing”, ISMIP VI, 2008.
  - 6) 국토해양부, “레미콘생산품질관리자동화시스템 개발(중간보고서)”, pp 5~8 , 2010.