



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

석 사 학 위 논 문

피복두께에 따른 강박스거더교의
온도설계기준에 대한 연구



신 호 경

부산대학교

사회환경시스템공학과 토목공학전공

2018년 02월

피복두께에 따른 강박스거더교의 온도설계기준에 대한 연구

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

신 효 경

부산대학교

사회환경시스템공학과 토목공학전공

지도교수 이 성 행

신 효 경의 공학석사 학위논문을 인준함

2017년 12월 18일

| | | |
|-----|-------|---|
| 위원장 | 정 진 환 | 인 |
|-----|-------|---|

| | | |
|-----|-------|---|
| 위 원 | 김 인 태 | 인 |
|-----|-------|---|

| | | |
|-----|-------|---|
| 위 원 | 이 성 행 | 인 |
|-----|-------|---|

차례

| | |
|------------------------------------|-----------|
| I. 서론 | 1 |
| 1. 연구 배경 | 1 |
| II. 관련 설계기준 | 2 |
| 1. 유효온도 설계기준 | 2 |
| 가. 유효온도 Euro code 설계 기준 | 2 |
| 나. 유효온도 도로교설계기준 (한계상태설계법, 평균온도 TU) | 4 |
| 2. 온도차 설계기준 | 5 |
| 가. 온도차 Euro code 설계 기준 | 5 |
| 나. 온도차 도로교설계기준 (한계상태설계법, 온도경사 TG) | 9 |
| III. 시험체 제작 및 데이터 측정 | 10 |
| 1. 시험체 제작 | 10 |
| 2. 측정 장비 및 측정 위치 | 11 |
| 가. 측정장비 | 11 |
| 나. 측정위치 | 13 |
| IV. 데이터 분석 | 15 |
| 1. 기상청 대기온도를 이용한 온도데이터 검증 | 15 |
| 2. 피복두께별 유효온도 산정 | 16 |
| 가. 측정예시 | 16 |
| 나. 유효온도 설계기준 | 23 |
| 다. 유효온도 분석방법 | 24 |
| 라. 유효온도 분석 | 29 |
| 3. 피복두께별 상·하연 온도차 산정 | 33 |
| 가. 온도차 설계기준 | 33 |
| 나. 측정예시 | 34 |
| 다. 기준 대기온도 설정 | 35 |

| | |
|------------------------|-----------|
| 라. 온도차 산정방법 | 36 |
| 마. 상·하연 온도차 분석결과 | 38 |
| V. 결론 | 45 |
| 참고문헌 | 46 |
| Abstract | 48 |
| 감사의 글 | 49 |



표 차례

| | |
|-----------------------------------------------|----|
| 표 1 교량 단면 내 최고 유효 온도 | 3 |
| 표 2 바닥판의 상부 표면처리에 따른 유효교량 온도의 조정 | 3 |
| 표 3 도로교설계기준 유효온도 온도 범위 | 4 |
| 표 4 Group 1, Group 2의 T 값 | 7 |
| 표 5 Group 3의 T 값 | 7 |
| 표 6 Group 4의 T 값 | 8 |
| 표 7 도로교설계기준 온도차 기본 값 | 9 |
| 표 8 온도계 제원 및 측정기간 | 13 |
| 표 9 2016 - 2017년 대기온도의 비교 | 15 |
| 표 10 2016년 피복 0mm 측정 온도 예시(SC1 ~ SC10) | 17 |
| 표 11 2016년 피복 0mm 측정 온도 예시(SC11 ~ SC20) | 18 |
| 표 12 2016년 피복 0mm 측정 온도 예시(SC21 ~ SC24) | 19 |
| 표 13 2016년 피복 0mm 5개 지점 추세선 | 21 |
| 표 14 2016 피복 0mm 각 지점의 평균, 표준편차 | 22 |
| 표 15 2017 피복 0mm 각 지점의 평균, 표준편차 | 22 |
| 표 16 시험체 피복두께에 따른 온도 조정치 | 23 |
| 표 17 피복두께에 따른 유효온도 설계기준 | 24 |
| 표 18 2016년 0mm 추세선 | 25 |
| 표 19 각 지점별 추세선 평균온도 | 26 |
| 표 20 2016년 0mm 표준오차 | 27 |
| 표 21 표준오차를 고려한 각 지점별 산정온도 | 28 |
| 표 22 각 지점별 면적 | 28 |
| 표 23 2016,2017년의 7-8월 기상청 대기온도 | 29 |
| 표 24 유효온도 분석결과 | 30 |
| 표 25 피복 두께에 따른 T_1 | 34 |
| 표 26 2016년 평균대기온도와 표준편차 | 36 |
| 표 27 2016년 0mm 상·하연 온도차 | 38 |
| 표 28 2016년 0mm 온도차 결과 | 39 |
| 표 29 50mm 온도차 결과 | 40 |

| | |
|-----------------------------|----|
| 표 30 100mm 온도차 결과 | 41 |
| 표 31 2017년 0mm 온도차 결과 | 42 |
| 표 32 150mm 온도차 결과 | 43 |
| 표 33 피복두께별 온도차 결과 정리 | 44 |



그림 차례

| | | |
|-------|--------------------------------------|----|
| 그림 1 | 피복두께에 따른 Euro code 설계기준 | 4 |
| 그림 2 | 상부구조 형식에 따른 Euro code 온도차 | 6 |
| 그림 3 | 콘크리트와 강재상부구조물에 발생하는 온도의 수직변화곡선 | 9 |
| 그림 4 | 0mm 시험체(Box A,2016~7) | 10 |
| 그림 5 | 50mm 시험체(Box B,2016) | 10 |
| 그림 6 | 100mm 시험체(Box C,2016) | 10 |
| 그림 7 | 150mm 시험체(Box D,2017) | 10 |
| 그림 8 | 측정 장비 설치모습 | 11 |
| 그림 9 | Data Logger(TDS-303) 설치모습 | 11 |
| 그림 10 | Data Logger(TDS-303) 사진 및 제원 | 12 |
| 그림 11 | Thermo-couple 사진 및 제원 | 12 |
| 그림 12 | 시험체 내부 온도계 부착 모습 | 13 |
| 그림 13 | 시험체 내부 온도계 부착 모습(2) | 13 |
| 그림 14 | 0mm 온도계 부착위치(2016) | 14 |
| 그림 15 | 50mm 온도계 부착위치(2016) | 14 |
| 그림 16 | 100mm 온도계 부착위치(2016) | 14 |
| 그림 17 | 0mm 온도계 부착위치(2017) | 14 |
| 그림 18 | 150mm 온도계 부착위치(2017) | 14 |
| 그림 19 | 2016년 대기온도의 비교 | 15 |
| 그림 20 | 2017년 대기온도의 비교 | 16 |
| 그림 21 | 0mm SC2지점 온도분포 | 20 |
| 그림 22 | 0mm SC3지점 온도분포 | 20 |
| 그림 23 | 0mm SC10지점 온도분포 | 20 |
| 그림 24 | 0mm SC11지점 온도분포 | 20 |
| 그림 25 | 0mm SC12지점 온도분포 | 20 |
| 그림 26 | 피복두께에 따른 유효온도 설계기준 | 23 |
| 그림 27 | 2016년 0mm SC2 | 27 |
| 그림 28 | 2016년 0mm SC12 | 27 |
| 그림 29 | 2016년, 2017년 0mm 유효온도 그래프 | 29 |

| | |
|--------------------------------------------|----|
| 그림 30 0mm 유효온도 그래프 | 31 |
| 그림 31 50mm 유효온도 그래프 | 31 |
| 그림 32 100mm 유효온도 그래프 | 32 |
| 그림 33 150mm 유효온도 그래프 | 32 |
| 그림 34 Group 3 형식의 Euro code 온도차 설계기준 | 33 |
| 그림 35 2016년 0mm SC24 온도데이터 | 34 |
| 그림 36 2016년 0mm SC3 온도데이터 | 34 |
| 그림 37 2016년 0mm SC12 온도데이터 | 35 |
| 그림 38 2016년 0mm SC13 온도데이터 | 35 |
| 그림 39 2016년 0mm SC18 온도데이터 | 35 |
| 그림 40 온도차 산정을 위한 기준 대기온도의 설정 | 36 |
| 그림 41 온도차 산정을 위한 SC24 온도 | 37 |
| 그림 42 온도차 산정을 위한 SC3 온도 | 37 |
| 그림 43 온도차 산정을 위한 SC12 온도 | 37 |
| 그림 44 온도차 산정을 위한 SC13 온도 | 37 |
| 그림 45 온도차 산정을 위한 SC18 온도 | 37 |
| 그림 46 2016년 0mm 온도차 그래프 | 39 |
| 그림 47 2016년 50mm 온도차 그래프 | 40 |
| 그림 48 2016년 100mm 온도차 그래프 | 41 |
| 그림 49 2017년 0mm 온도차 그래프 | 42 |
| 그림 50 2017년 150mm 온도차 그래프 | 43 |

수식차례

| | |
|-----------------------------------|----|
| 수식 1 티센가중법(Thiessen method) | 24 |
|-----------------------------------|----|



피복두께에 따른 강박스거더교의 온도설계기준에 대한 연구

신 호 경

부산대학교 일반대학원 사회환경시스템공학과 토목공학전공

요약

본 연구는 콘크리트 슬래브가 있는 강박스거더교의 피복두께에 따른 온도설계기준을 마련하기 위한 연구이다. 현행 도로교설계기준은 피복두께에 따른 온도설계기준(유효온도, 상·하연 온도차)이 마련되어 있지 않으나, 선진설계법인 Euro code는 피복두께에 따른 온도설계기준이 상세히 마련되어 있다. 이를 위해 0mm, 50mm, 100mm, 150mm 피복을 갖는 강박스거더 모형 시험체를 제작하고, 각 모형에 17~23개의 온도 센서를 콘크리트 슬래브부와 스틸박스부에 부착하였다. 2년간 온도측정을 수행하고 측정데이터를 바탕으로 유효온도와 상·하연 온도차를 분석하였다. 유효온도 분석결과 피복 0mm 시험체의 유효온도 분석결과는 대기온도 24 ~ 38°C 구간 중 대기온도 33°C 이상의 온도에서 Euro code보다 높게 산정되었으며, 분석된 유효온도와 Euro code 사이에 약 4.2%의 오차율을 보인다. 피복 50mm 시험체의 유효온도는 대기온도 28°C 이상의 온도에서 Euro code보다 높게 산정되었으며 약 4.1%의 오차율을 보인다. 피복 100mm 시험체의 유효온도는 대기온도 전 구간에서 Euro code보다 높게 산정되었으며 약 6.4%의 오차율을 보인다. 피복 150mm 시험체의 유효온도 역시 대기온도 전 구간에서 Euro code보다 높게 산정되었으며 약 8.0%의 오차율을 보인다. 피복두께에 따른 유효온도는 Euro code와 비교하여 약간 높게 산정되었으나 그 편차는 신뢰성이 있는 것으로 판단된다. 또한, 온도차 분석결과는 Euro code와 비교하여 약 3.4 ~ 10.7% 정도의 편차를 보이며 비교적 유사한 온도차를 보인다. 향후 구체적인 온도설계기준(유효온도, 온도차)을 위해 다년간의 온도측정데이터가 요구되며, 본 연구를 통해 피복두께에 따른 온도설계기준(유효온도, 온도차)은 설계온도 하중 산정 시 매우 유용한 기초자료가 될 것으로 판단된다.

핵심용어 : 유효온도, 온도차, 피복 두께, 온도설계기준, 강박스거더 모형

I. 서론

1. 연구 배경

선진 설계법인 유럽의 Euro code^[1], 미국의 AASHTO LRFD Bridge Design Specifications^{[2][3]}, 캐나다의 Canadian Highway Bridge Design Code를 살펴보면 온도하중에 대한 설계기준은 오랜 시간 축적된 자료를 바탕으로 세부적이고 구체적인 설계법을 갖추고 있다는 것을 알 수 있다. Euro code의 온도하중에 대한 설계기준은 교량의 형식에 따라 설계 기준을 구분하고 있으며, 기후 및 피복두께에 따라서도 세부설계기준이 마련되어있다. AASHTO LRFD는 미국 전 영토를 4분할하여 각각에 맞는 온도설계기준을 제시하고 있다^[2].

우리나라의 도로교설계기준^[4] 역시 지역·경제·사회적 상황에 맞추어 꾸준히 발전해 오고 있다. 하지만 2016년 한계상태설계법으로 전면 개정되었음에도 불구하고 온도하중에 관한 설계기준은 이전의 설계기준을 그대로 따르고 있다. 국내 온도하중에 대한 설계기준을 보면 미국의 LRFD, 유럽의 Euro code를 일부 변형하거나 그대로 차용한 형태라는 것을 알 수 있다. 이러한 차이를 극복하기 위하여 많은 연구가 선행되고 있고^{[5][6]} 본 연구에서도 피복두께(콘크리트 상판위의 아스팔트)에 따른 교량의 유효온도 및 상·하연 온도차에 대한 연구를 하여 설계기준을 위한 기초자료를 마련하고자 한다.

본 연구를 위해 우리나라 교량 형식 중 가장 많이 사용되는 강박스거더교 모형을 제작하여 2년간 온도를 측정하였다. 측정 1차년도(2016)에는 3개소의 시험체를 제작하고 피복두께를 각각 0mm, 50mm, 100mm로 설정하였다. 측정 2차년도(2017)에는 2개소의 시험체를 제작하고 피복두께를 각각 0mm, 150mm로 설정하였다. 피복두께의 설정은 Euro code를 참고하였고, 이후 측정된 온도를 기상청의 온도자료를 활용하여 데이터의 신뢰성을 검증한 뒤, 검증된 데이터를 기반으로 유효온도와 상·하연 온도차를 분석하였다.

II. 관련 설계기준

1. 유효온도 설계기준

가. 유효온도 Euro code 설계 기준

유효온도 Euro code 설계기준을 살펴보면 다음과 같다. 아래 표 1은 교량형식에 따른 Euro code 설계기준을 나타낸 표이다. 표 1의 Group 1은 Steel deck on steel box girders 형식이고, Group 2는 Steel deck on plate girder 형식이다. Group 3은 Concrete deck on steel box, or plate girders, Group 4는 Concrete slab in concrete beams or box girders 형식이다.^[1] 표 2는 피복 두께에 따른 Euro code 온도 조정치를 나타낸 표이다. Euro code 기준에 따르면 교량상판에 피복이 없으면 Group 1, Group 2 형식은 +4°C, 나머지 형식은 0°C의 유효온도 조정이 필요하다. 방수처리만 있는 경우는 Group 3에서 +4°C Group 4에서 +2°C로 상향조정이 필요하고, 피복 40mm에서 역시 Group 3, Group 4에서 각각 +2°C, +1°C의 유효온도 상향조정이 필요하다. 상부 피복 100mm에서는 모든 교량형식에서 온도조정이 필요 없고, 상부 피복 200mm에서는 Group 3, Group 4에서 각각 -4°C, -2°C의 하향온도조정을 해야 한다고 명시되어있다. 온도 조정을 하여 유효온도를 나타내면 아래 그림 1과 같다.^[1]

본 연구에서는 우리나라에서 가장 흔히 볼 수 있는 교량 형식인 강합성거더교(Group 3)을 제작하여 실측한 뒤 데이터를 분석 해 보았다. 표 1의 Group 3의 유효온도를 보면 대기온도 38°C에서 교량 유효온도는 40°C, 대기온도 24°C에서 교량유효온도는 31°C로 대기온도보다 교량의 온도가 더 높다는 것을 알 수 있다. 표 2의 Group 3의 상부 피복 두께에 따른 온도 조정치를 보면 방수처리만 한 교량의 유효온도가 가장 높고 상부 피복이 두께 200mm를 가지면 교량의 유효온도가 상부 피복이 없는 교량에 비해 유효온도가 낮다는 것을 알 수 있다. 이를 통해 얇은 두께의 피복은 교량의 유효온도를 높이지만 두꺼운 상부피복은 교량의 유효온도를 낮추는 효과를 가져 온다는 것을 추론해 볼 수 있다.

표 1 교량 단면 내 최고 유효 온도^[1]

| 최고 대기온도 | 최고 유효 교량온도 | | |
|---------|------------|---------|--------------|
| | 상부구조 형식 | | |
| | Group 1, 2 | Group 3 | Group 4(CON) |
| ℃ | ℃ | ℃ | ℃ |
| 24 | 40 | 31 | 27 |
| 25 | 41 | 32 | 28 |
| 26 | 41 | 33 | 29 |
| 27 | 42 | 34 | 29 |
| 28 | 42 | 34 | 30 |
| 29 | 43 | 35 | 31 |
| 30 | 44 | 36 | 32 |
| 31 | 44 | 36 | 32 |
| 32 | 44 | 37 | 33 |
| 33 | 45 | 37 | 33 |
| 34 | 45 | 38 | 34 |
| 35 | 46 | 39 | 35 |
| 36 | 46 | 39 | 36 |
| 37 | 46 | 40 | 36 |
| 38 | 47 | 40 | 37 |

표 2 바닥판의 상부 표면처리에 따른 유효교량 온도의 조정^[1]

| 바닥판 상부 | 최고 유효 교량온도에 대한 조정치 | | |
|------------|--------------------|---------|---------|
| | 그룹 1, 2 | 그룹 3 | 그룹 4 |
| | ℃ | ℃ | ℃ |
| 처리 없음 | +4 | 0 | 0 |
| 방수 처리 | | +4 | +2 |
| 40mm 오버레이 | 0 | +2 | +1 |
| 100mm 오버레이 | - | 0 | 0 |
| 200mm 오버레이 | - | -4 | -2 |

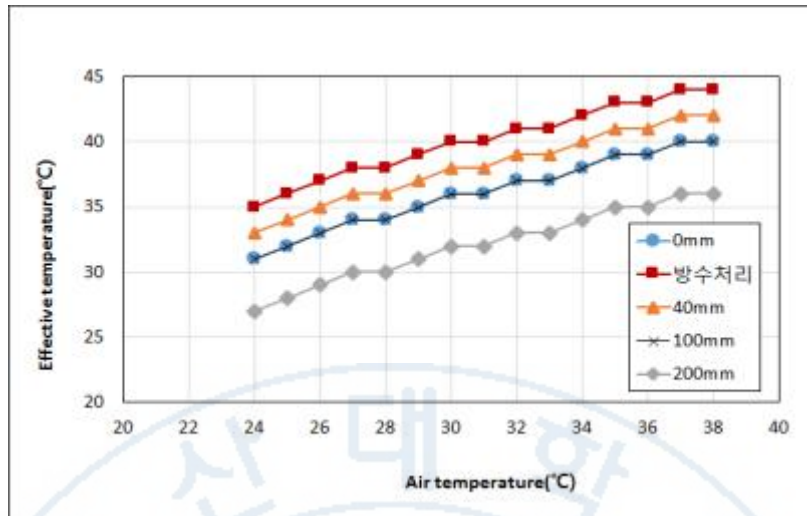


그림 1 피복두께에 따른 Euro code 설계기준

나. 유효온도 도로교설계기준 (한계상태설계법, 평균온도 TU)

유효온도 도로교설계기준을 보면 아래 표 3과 같다. 온도에 관한 정확한 자료가 없을 때, 온도의 범위는 표 3에 나타난 값을 사용한다. 도로교 설계기준을 살펴보면 교량의 형식과 기후에 따른 유효온도 기준은 구분되어있으나 피복두께에 따른 유효온도 설계기준은 따로 마련되어 있지 않다는 것을 알 수 있다. 또한 유효온도 기준역시 각 대기온도 별로 유효온도가 각각 마련되어 있는 Euro code에 비해 도로교설계기준은 대략적인 유효온도 범위만 제시하고 있다.^[4]

표 3 도로교설계기준 유효온도 온도 범위^[4]

| 기후 | 강교 (강바닥판) | 합성교 (강거더와 콘크리트바닥판) | 콘크리트교 |
|-----|--------------|-----------------------|--------------|
| 보 통 | -10°C에서 50°C | -10°C에서 40°C | -5°C에서 35°C |
| 한 랭 | -30°C에서 50°C | -20°C에서 40°C | -15°C에서 35°C |

2. 온도차 설계기준

가. 온도차 Euro code 설계 기준

온도차 Euro code 설계기준을 살펴보면 아래 그림 2, 표 4 ~ 표 6과 같다. 온도차 설계기준 역시 교량 형식을 4가지로 분류하여 Group 별로 다른 설계기준을 제시하고 있다.^[1] 또한 최고온도 온도차와 최저온도 온도차를 구분하여 크게 6가지로 온도차 설계기준이 구분되어있다. 또한 피복두께에 따른 온도차 온도 T를 아래 표 4 ~ 표 6과 같이 구분하고 있다.^[1]

본 연구에서 제작한 강합성 거더형식(Group 3)의 Euro code 설계기준을 보면(표 5) 상부 콘크리트 슬래브 200mm에서 상·하연 온도차는 피복이 없을 때 16.5°C, 방수처리만 했을 경우는 23°C, 상부피복 50mm에서 18°C, 상부피복 100mm에서 13°C, 상부피복 150mm에서 10.5°C, 상부피복 200mm에서 8.5°C의 온도차가 난다고 명시되어있다. 유효온도와 마찬가지로 온도차 설계기준에서 역시 얇은 두께의 상부피복은 교량의 온도차를 크게 하는 효과가 있고, 두꺼운 상부피복은 교량의 온도 차이를 낮추는 효과를 가져 온다는 것을 추론할 수 있다.

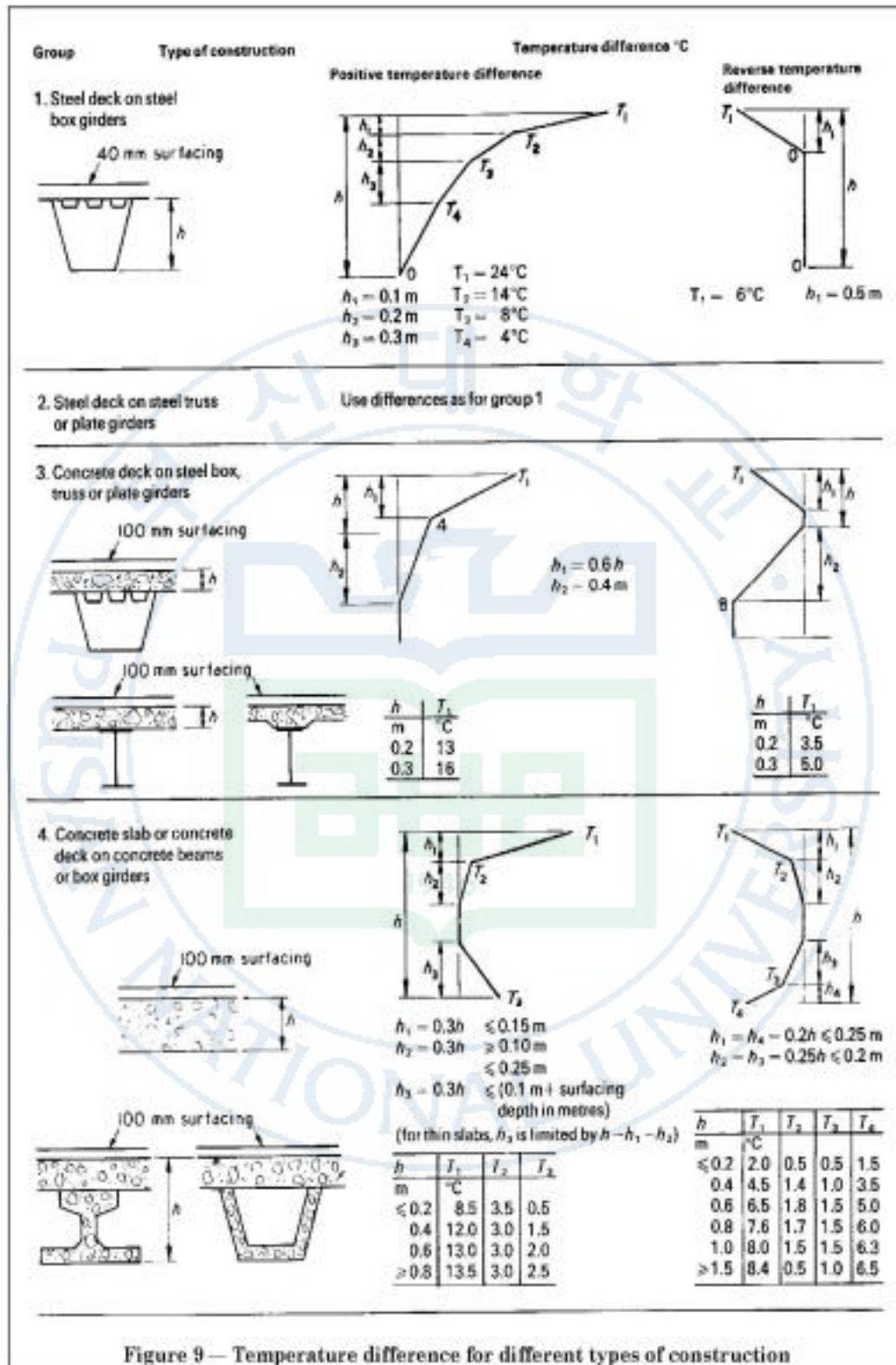


그림 2 상부구조 형식에 따른 Euro code 온도차^[1]

표 4 Group 1, Group 2의 T 값^[1]

| Surfacing thickness | Positive temperature difference | | | | Reverse temperature difference |
|---------------------|---------------------------------|-------|-------|-------|--------------------------------|
| | T_1 | T_2 | T_3 | T_4 | T_1 |
| mm | ° C | ° C | ° C | ° C | ° C |
| unsurfaced | 30 | 16 | 6 | 3 | 8 |
| 20 | 27 | 15 | 9 | 5 | 6 |
| 40 | 24 | 14 | 8 | 4 | 6 |

표 5 Group 3의 T 값^[1]

| Depth of slab(h) | Surfacing thickness | Positive temperature difference | Reverse temperature difference |
|------------------|---------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| | | T_1 | T_1 |
| m | mm | ° C | ° C |
| 0.2 | unsurfaced | 16.5 | 5.9 |
| | waterproofed | 23 | 5.9 |
| | 50 | 18 | 4.4 |
| | 100 | 13 | 3.5 |
| | 150 | 10.5 | 2.3 |
| | 200 | 8.5 | 1.6 |
| 0.3 | unsurfaced | 18.5 | 9 |
| | waterproofed | 26.5 | 9 |
| | 50 | 20.5 | 6.8 |
| | 100 | 16 | 5 |
| | 150 | 12.5 | 3.7 |
| | 200 | 10 | 2.7 |

표 6 Group 4의 T 값^[1]

| Depth of slab(h) | Surfacing thickness | Positive temperature difference | | | Reverse temperature difference | | | |
|----------------------------|------------------------|---------------------------------------|-------------|-------------|-----------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| | | T_1 | T_2 | T_3 | T_1 | T_2 | T_3 | T_4 |
| m | mm | $^{\circ}C$ | $^{\circ}C$ | $^{\circ}C$ | $^{\circ}C$ | $^{\circ}C$ | $^{\circ}C$ | $^{\circ}C$ |
| ≤ 0.2 | unsurfaced | 12.0 | 5.0 | 0.1 | 4.7 | 1.7 | 0.0 | 0.7 |
| | waterproofed | 19.5 | 8.5 | 0.0 | 4.7 | 1.7 | 0.0 | 0.7 |
| | 50 | 13.2 | 4.9 | 0.3 | 3.1 | 1.0 | 0.2 | 1.2 |
| | 100 | 8.5 | 3.5 | 0.5 | 2.0 | 0.5 | 0.5 | 1.5 |
| | 150 | 5.6 | 2.5 | 0.2 | 1.1 | 0.3 | 0.7 | 1.7 |
| | 200 | 3.7 | 2.0 | 0.5 | 0.5 | 0.2 | 1.0 | 1.8 |
| | | | | | | | | |
| 0.4 | unsurfaced | 15.2 | 4.4 | 1.2 | 9.0 | 3.5 | 0.4 | 2.9 |
| | waterproofed | 23.6 | 6.5 | 1.0 | 9.0 | 3.5 | 0.4 | 2.9 |
| | 50 | 17.2 | 4.6 | 1.4 | 6.4 | 2.3 | 0.6 | 3.2 |
| | 100 | 12.0 | 3.0 | 1.5 | 4.5 | 1.4 | 1.0 | 3.5 |
| | 150 | 8.5 | 2.0 | 1.2 | 3.2 | 0.9 | 1.4 | 3.8 |
| | 200 | 6.2 | 1.3 | 1.0 | 2.2 | 0.5 | 1.9 | 4.0 |
| | | | | | | | | |
| 0.6 | unsurfaced | 15.2 | 4.0 | 1.4 | 11.8 | 4.0 | 0.9 | 4.6 |
| | waterproofed | 23.6 | 6.0 | 1.4 | 11.8 | 4.0 | 0.9 | 4.6 |
| | 50 | 17.6 | 4.0 | 1.8 | 8.7 | 2.7 | 1.2 | 4.9 |
| | 100 | 13.0 | 3.0 | 2.0 | 6.5 | 1.8 | 1.5 | 5.0 |
| | 150 | 9.7 | 2.2 | 1.7 | 4.9 | 1.1 | 1.7 | 5.1 |
| | 200 | 7.2 | 1.5 | 1.5 | 3.6 | 0.6 | 1.9 | 5.1 |
| | | | | | | | | |
| 0.8 | unsurfaced | 15.4 | 4.0 | 2.0 | 12.8 | 3.3 | 0.9 | 5.6 |
| | waterproofed | 23.6 | 5.0 | 1.4 | 12.8 | 3.3 | 0.9 | 5.6 |
| | 50 | 17.8 | 4.0 | 2.1 | 9.8 | 2.4 | 1.2 | 5.8 |
| | 100 | 13.5 | 3.0 | 2.5 | 7.6 | 1.7 | 1.5 | 6.0 |
| | 150 | 10.0 | 2.5 | 2.0 | 5.8 | 1.3 | 1.7 | 6.2 |
| | 200 | 7.5 | 2.1 | 1.5 | 4.5 | 1.0 | 1.9 | 6.0 |

나. 온도차 도로교설계기준 (한계상태설계법, 온도경사 TG)

온도차 도로교설계기준을 보면 다음과 같다. 상부의 온도가 높을 때의 T_1 과 T_2 의 값은 표 7과 같다. 현장조사에 의하여 T_3 의 값을 정하지 않는 경우, T_3 의 값은 영(0°C)으로 하여야 한다. 온도경사를 고려할 때 양 또는 음의 온도변화에 의한 내부응력과 구조변형은 그림 3에 의하여 결정하여야 한다. 이를 보면 도로교설계기준은 교량형식에 따른 설계기준이 마련되어 있지 않았고, 또한 상부피복 두께에 따라 T_1 과 T_2 의 값이 상세히 마련되어 있는 Euro code에 비해 도로교설계기준은 피복두께에 따른 설계기준 역시 규정되지 않았다.^[4]

표 7 도로교설계기준 온도차 기본 값^[4]

| $T_1(^{\circ}\text{C})$ | $T_2(^{\circ}\text{C})$ |
|-------------------------|-------------------------|
| 23 | 6 |

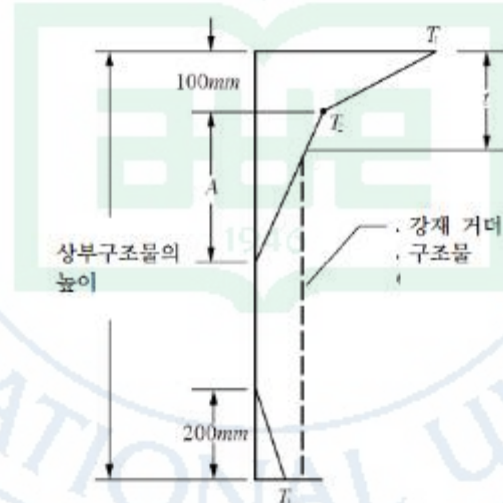


그림 3 콘크리트와 강재상부구조물에 발생하는 온도의 수직변화곡선^[4]

III. 시험체 제작 및 데이터 측정

1. 시험체 제작

시험체는 피복 0mm(Box A), 50mm(Box B), 100mm(Box C), 150mm(Box D) 두께로 제작하고 경상남도 양산시 물금읍 부산대학교 캠퍼스 내에 설치하였다. 기준군이 되는 피복 0mm 시험체는 2016년 2017년 2년간 온도를 측정하였고, 피복 50mm, 100mm 시험체는 2016년 1년간 측정하였다. 피복 150mm 시험체는 2017년 1년간 온도를 측정하였다. 아래 그림 4 ~ 그림 7은 피복 두께별 시험체의 모습을 나타낸 것이다. 시험체는 지열의 영향을 최소화하기 위해 지면에서 1m 이격하여 설치하였다. 강 박스의 폭, 높이, 길이는 각각 2m, 2m, 3m이고, 콘크리트 슬래브는 폭 4m, 두께 0.2m 이다.



그림 4 0mm 시험체(Box A, 2016~7)



그림 5 50mm 시험체(Box B, 2016)



그림 6 100mm 시험체(Box C, 2016)



그림 7 150mm 시험체(Box D, 2017)

2. 측정 장비 및 측정 위치

가. 측정장비

측정 장비와 설치된 모습은 아래 그림 8 ~ 그림 11에 나타나 있는 것과 같다. Data Logger (TDS-303)를 1set 사용하였다.



그림 8 측정 장비 설치모습



그림 9 Data Logger(TDS-303) 설치모습

TDS-303



■ 측정점수

내장 : 30채널 (기본 10 채널)
스위치박스 사용시 : 1000채널

■ 측정대상

Strain Gauge, Strain Gauge식 변형기,
열전대, 벽금속온저항체, 직류전압

■ 측정속도

신상충적분발식 : 0.06초

외형치수 : 320(W)×130(H)×440(D)mm

중량 : 약 9kg

전원 : AC85~250V 50/60Hz 90VA MAX

× DC는 별도DC Pack 또는 리모토파워콘트롤
등이 필요

■ 특징

- 고분해능 (0.1×10^{-6} strain) 모드 탑재
- 새로운 Strain 측정방법 Comet 탑재
- 각절 계수설정제 따른 물리량 직독
- Sleep Interval Timer, Monitor Comparator 내장
- 데이터 메모리, 플로피디스크, 메모리카드 탑재
- GP-IB, RS-232C 표준타재
- 최대 30채널의 반도체릴레이 스위치박스를
내장가능 (표준 10채널)

그림 10 Data Logger(TDS-303) 사진 및 제원

Thermocouple T and K



열전대의 한쪽끝을 피측정물에 취부하고, 다른
쪽을 Data Logger (TDS-303 / TDS-602 등) 에
접속하면, 콘크리트 구조물이나 철골 구조물의 내
부온도를 비롯해서, 재료등의 표면온도측정을 간
단하게 할 수 있다.

▶ 사양서

| 열전대 종류 | 심선직경 | 피복 | 피복의 색 | 피복의 내열온도 | coil의 길이 | 비 고 |
|--------|--------|------|-------|----------|----------|-----|
| T | 0.32mm | 내열비닐 | 발색 | 약 100℃ | 100m | |
| T | 0.65mm | 내열비닐 | 발색 | 약 100℃ | 100m | |
| T | 0.32mm | 테프론 | 발색 | 약 200℃ | 100m | |
| T | 0.65mm | 테프론 | 발색 | 약 200℃ | 100m | |
| T | 0.65mm | 내열비닐 | 발색 | 약 100℃ | 100m | |
| K | 0.32mm | 테프론 | 청색 | 약 350℃ | 100m | |
| K | 0.65mm | 테프론 | 청색 | 약 350℃ | 100m | |

그림 11 Thermo-couple 사진 및 제원

나. 측정위치

온도계는 아래 표 8에 나타난 것과 같이, 2016년 시험체에는 0mm에 23개, 50mm와 100mm 시험체에 각각 24개씩 부착하였다. 2017년 시험체에는 0mm, 150mm 시험체에 각각 17개의 온도계를 부착하고 측정하였다.

표 8 온도계 제원 및 측정기간

| | 2016 | | | 2017 | |
|-------------|----------------------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| | 0mm | 50mm | 100mm | 0mm | 150mm |
| 온도계설치 | SC1~SC23 | SC1~SC25 | SC1~SC25 | SC1~SC17 | SC1~SC17 |
| 개수 | 23개 | 24개 | 24개 | 17개 | 17개 |
| 전체 측정기간 | 2016.06.30~2017년 현재 | | | | |
| 본 연구 온도산정기간 | 2016.06.30~2016.09.02, 2017.06.30~2017.09.02 | | | | |

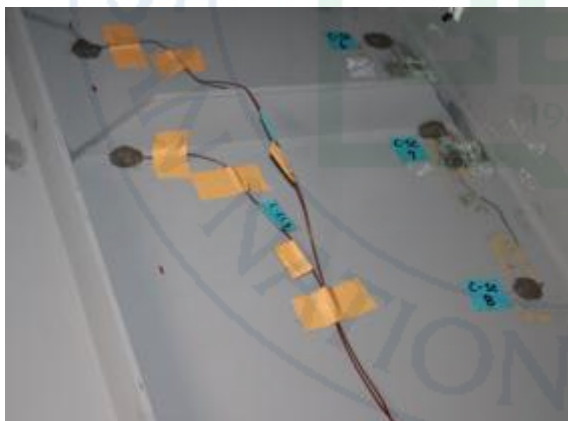


그림 12 시험체 내부 온도계 부착 모습



그림 13 시험체 내부 온도계 부착 모습(2)

아래 그림 14 ~ 그림 18은 온도계 설치 위치를 나타낸 그림으로 콘크리트 슬래브에 높이별로 4~5개의 온도계가 부착되어있고, 강박스의 상하부 플랜지와 좌우 웨브에 온도계를 부착하였다.

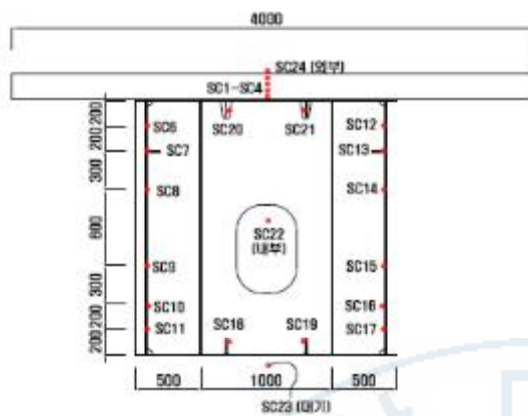


그림 14 0mm 온도계 부착위치(2016)

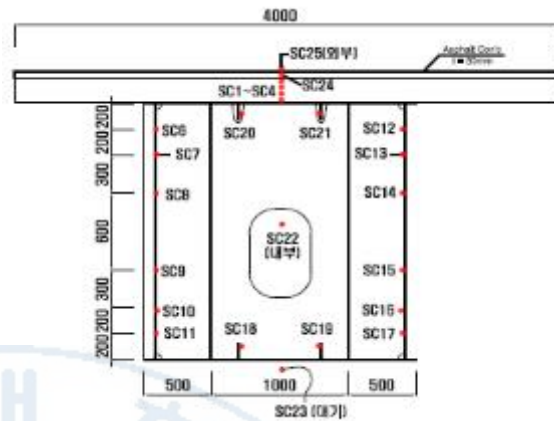


그림 15 50mm 온도계 부착위치(2016)

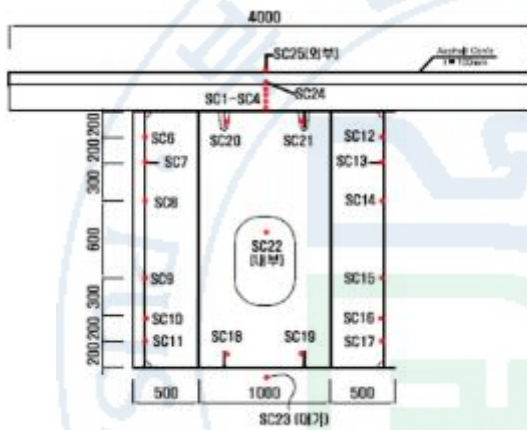


그림 16 100mm 온도계 부착위치(2016)

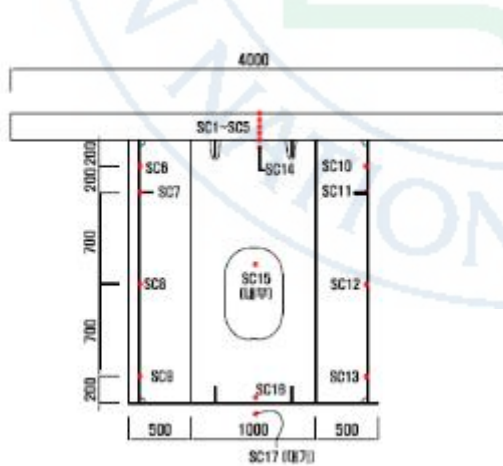


그림 17 0mm 온도계 부착위치(2017)

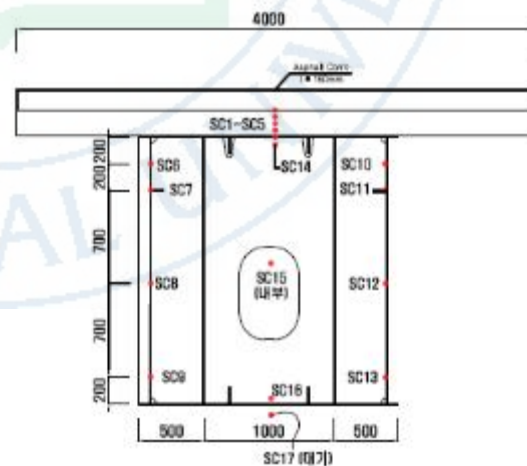


그림 18 150mm 온도계 부착위치(2017)

IV. 데이터 분석

1. 기상청 대기온도를 이용한 온도데이터 검증

2년간 측정된 온도데이터를 바탕으로 측정 데이터를 검증해 보았다. 2016년 대기온도를 측정했던 SC23번 온도측정계의 데이터와 2017년 대기온도를 측정했던 SC17번 온도측정계의 데이터 자료를 양산 기상청 대기온도 자료와 비교해 보았다. 아래 표 9은 측정기간 동안의 기상청 평균 대기온도와 측정된 평균 대기온도를 나타낸 것이다. 기상청 대기온도와 측정 대기온도의 오차율은 2016년에 약 0.70%, 2017년에 약 0.43%로 상당히 유사하다는 것을 알 수 있다. 이는 측정된 온도 데이터가 신뢰성을 가진다는 간접적인 지표로 활용할 수 있을 것이다. 아래 그림 19, 그림 20은 기상청 대기온도와 측정대기온도를 그래프로 나타낸 것이다. 그림 19는 2016년도의 기상청 대기온도와 시험체 대기온도 그래프, 그림 20은 2017년도의 기상청 대기온도와 시험체 대기온도 그래프이다. 그림에서 기상청 대기온도와 측정 대기온도가 상당히 유사하다는 것을 볼 수 있다.

표 9 2016 - 2017년 대기온도의 비교

| | 기상청(°C) | 측정(°C) | 오차율(%) |
|------|---------|--------|--------|
| 2016 | 26.9 | 27.1 | 0.70 |
| 2017 | 27.4 | 27.6 | 0.43 |

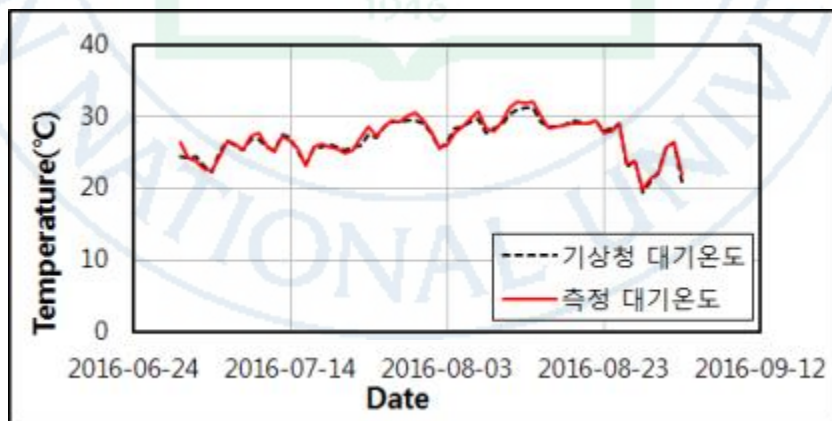


그림 19 2016년 대기온도의 비교



그림 20 2017년 대기온도의 비교

2. 피복두께별 유효온도 산정

가. 측정예시

데이터는 2016년 2017년 2년간 측정 되었다. 아래 표 10 ~ 표 12는 측정 된 데이터의 일부를 나타 낸 것으로, 2016년 피복 0mm 시험체의 7월 1일자 데이터를 나타낸 것이다. 데이터는 매 30분마다 측정되었고 하루에 24개의 데이터가 수집되었다. 측정 기간 동안 5개 시험체는 각 3061개의 데이터가 측정되었고 아래 그림 21 ~ 그림25는 각 지점마다 3061개의 데이터가 찍혀있다. 그래프의 가로축은 측정 기간 동안의 대기온도를 나타낸 것이고 세로축은 각 온도측정계의 온도측정값을 나타낸다. 또한 유효온도를 산정하기위해 그래프에 추세선을 표시하였고 아래 그림은 2016년 0mm 시험체 온도계 24개 중 대표적인 5개 지점을 도시한 것이다.

그림 21, 그림 22는 각각 SC2번 SC3번으로 시험체 최상부에서 50mm, 100mm 내려온 위치이고 콘크리트 슬래브 속 온도측정계이다. 그림 23, 그림 24는 SC10번 SC11번 위치로 시험체 최상부에서 각각 1800mm, 2000mm 위치에 있고 강박스 왼쪽 플랜지에 부착된 온도계이다. 그림 25는 SC12번으로 시험체 최상부에서 400mm 내려온 지점이고 강박스 오른쪽 플랜지에 부착되어있다. 그림을 보면 콘크리트 속 온도계는 추세선을 중심으로 넓은 띠 모양을 보이고 있고 강박스 속 온도계는 추세선을 중심으로 좁은 띠 모양을 보이는 것을 알 수 있다. 표 10은 유효온도를 산정하기 위해 추세선 방정식을 나타낸 것이고, 강재부분은 선형으로, 콘크리트 내부는 다항식으로 추세선을 도출하여 상관계수(R^2) 값을 높게 산정하였다.

표 10 2016년 피복 0mm 측정 온도 예시(SC1 ~ SC10)

| 시간 | SC1 | SC2 | SC3 | SC4 | SC5 | SC6 | SC7 | SC8 | SC9 | SC10 |
|------------------|------|------|------|------|------|------|-------|------|------|------|
| 2016-07-01 0:14 | 28.5 | 28.4 | 26.7 | 29.3 | 26.5 | 25.3 | 22.85 | 20.4 | 22.2 | 23.1 |
| 2016-07-01 0:44 | 28 | 27.9 | 26.1 | 28.7 | 25.9 | 24.7 | 22.5 | 20.3 | 22.3 | 22.8 |
| 2016-07-01 1:14 | 28.3 | 27.9 | 25.9 | 28.7 | 25.9 | 24.5 | 23.6 | 22.7 | 22 | 22.6 |
| 2016-07-01 1:44 | 27.9 | 27.7 | 25.7 | 28.3 | 25.7 | 24.9 | 23.9 | 22.9 | 21.5 | 22.6 |
| 2016-07-01 2:14 | 27.9 | 27.6 | 25.7 | 28.3 | 25.5 | 25.5 | 23.1 | 20.7 | 19.1 | 18.3 |
| 2016-07-01 2:44 | 28 | 27.7 | 25.6 | 28.2 | 25.4 | 24.7 | 23.45 | 22.2 | 21.9 | 23 |
| 2016-07-01 3:14 | 27.9 | 27.4 | 25.4 | 27.9 | 25.2 | 24.7 | 22.8 | 20.9 | 21.8 | 22.9 |
| 2016-07-01 3:44 | 27.5 | 27.1 | 25 | 27.7 | 24.8 | 24.6 | 23.6 | 22.6 | 21.9 | 22.6 |
| 2016-07-01 4:14 | 27 | 26.6 | 24.6 | 27.2 | 24.3 | 24 | 22.05 | 20.1 | 21.3 | 22.4 |
| 2016-07-01 4:44 | 27.3 | 26.6 | 24.7 | 27.3 | 24.5 | 24.2 | 21.85 | 19.5 | 21.4 | 22.4 |
| 2016-07-01 5:14 | 27.3 | 26.7 | 24.5 | 27.2 | 24.3 | 24.3 | 22 | 19.7 | 21.7 | 22.6 |
| 2016-07-01 5:44 | 27.1 | 26.4 | 24.3 | 26.9 | 24.2 | 24.3 | 22 | 19.7 | 21.7 | 22.9 |
| 2016-07-01 6:14 | 27.1 | 26.2 | 24 | 26.6 | 24.1 | 24.5 | 22.5 | 20.5 | 21.7 | 22.9 |
| 2016-07-01 6:44 | 27.2 | 26.5 | 24.2 | 26.6 | 24 | 24.6 | 23.75 | 22.9 | 21.9 | 23.2 |
| 2016-07-01 7:14 | 27.6 | 26.7 | 24.2 | 26.8 | 24.4 | 25 | 24.05 | 23.1 | 22.4 | 23.6 |
| 2016-07-01 7:44 | 27.2 | 26.2 | 23.9 | 26.2 | 24.1 | 24.3 | 23.85 | 23.4 | 22.1 | 23 |
| 2016-07-01 8:14 | 27.3 | 26.3 | 24 | 26.3 | 24.3 | 24.4 | 23.8 | 23.2 | 22.3 | 23.2 |
| 2016-07-01 8:44 | 27.4 | 26.3 | 23.9 | 26.3 | 24.3 | 23.9 | 23.8 | 23.7 | 21.5 | 22.9 |
| 2016-07-01 9:14 | 27.6 | 26.4 | 24 | 26.3 | 24.6 | 24.5 | 24.25 | 24 | 22.5 | 23.7 |
| 2016-07-01 9:44 | 27.7 | 26.3 | 23.6 | 26.2 | 24.3 | 25.2 | 24.4 | 23.6 | 22.6 | 24.4 |
| 2016-07-01 10:14 | 27.2 | 26.2 | 23.6 | 26.3 | 24.4 | 25.3 | 23.85 | 22.4 | 23 | 24.4 |
| 2016-07-01 10:44 | 26.4 | 25.6 | 23.5 | 26.3 | 24.3 | 25 | 23.45 | 21.9 | 20.1 | 24 |
| 2016-07-01 11:14 | 26.2 | 25.5 | 23.1 | 26.3 | 24.2 | 24.3 | 22.05 | 19.8 | 23.1 | 23.7 |
| 2016-07-01 11:44 | 25.8 | 25.4 | 23.1 | 26.1 | 24.1 | 23.5 | 21.5 | 19.5 | 21.8 | 22.5 |
| 2016-07-01 12:14 | 25.8 | 25.6 | 22.8 | 25.9 | 24.1 | 23.7 | 22 | 20.3 | 21.9 | 22.8 |
| 2016-07-01 12:44 | 25.7 | 25.5 | 22.6 | 25.9 | 24 | 23.1 | 21.05 | 19 | 21.6 | 22.7 |
| 2016-07-01 13:14 | 25.6 | 25.2 | 22.5 | 25.7 | 24 | 23.5 | 21.8 | 20.1 | 21.5 | 22.3 |
| 2016-07-01 13:44 | 25.2 | 25.1 | 21.8 | 25.6 | 23.7 | 23.5 | 17.2 | 10.9 | 22.4 | 23.1 |

표 11 2016년 피복 0mm 측정 온도 예시(SC11 ~ SC20)

| 시간 | SC11 | SC12 | SC13 | SC14 | SC15 | SC16 | SC17 | SC18 | SC19 | SC20 |
|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 2016-07-01 0:14 | 21 | 23.9 | 24.5 | 20.4 | 21.2 | 23.2 | 24.2 | 23 | 14.9 | 27.7 |
| 2016-07-01 0:44 | 20.5 | 23.7 | 24.4 | 20.2 | 21.1 | 22.7 | 24 | 22.7 | 15.3 | 27.4 |
| 2016-07-01 1:14 | 20.5 | 23.4 | 24.2 | 20.1 | 21 | 22.5 | 24.2 | 22.6 | 17.1 | 27.2 |
| 2016-07-01 1:44 | 20.7 | 23.2 | 24.2 | 20.2 | 21.1 | 22.9 | 24.3 | 22.7 | 15.2 | 27.1 |
| 2016-07-01 2:14 | 19.4 | 22.2 | 24 | 19.7 | 20.9 | 22.2 | 24.2 | 22.8 | 15 | 26.7 |
| 2016-07-01 2:44 | 21.4 | 22.5 | 24 | 20.2 | 21.3 | 23.2 | 24.4 | 23 | 15.5 | 26.7 |
| 2016-07-01 3:14 | 21.2 | 23.4 | 23.8 | 20.1 | 21.2 | 23.4 | 24.2 | 22.7 | 15.4 | 26.5 |
| 2016-07-01 3:44 | 20.8 | 22.9 | 24 | 20.2 | 21 | 22.9 | 24.2 | 23 | 14.9 | 26.5 |
| 2016-07-01 4:14 | 20.8 | 22.6 | 23.9 | 20 | 20.9 | 22.3 | 24 | 22.5 | 17.1 | 26.2 |
| 2016-07-01 4:44 | 20.2 | 22.6 | 23.5 | 19.9 | 20.8 | 22.7 | 23.9 | 22.4 | 15.4 | 25.9 |
| 2016-07-01 5:14 | 21.1 | 22.8 | 23.7 | 20.2 | 21.2 | 22.6 | 24.2 | 22.7 | 15.7 | 26.1 |
| 2016-07-01 5:44 | 20.5 | 22.7 | 23.6 | 20.5 | 21.5 | 23.1 | 24.6 | 22.7 | 15.8 | 25.8 |
| 2016-07-01 6:14 | 21 | 23.3 | 24.1 | 21.7 | 23.2 | 24.5 | 26.1 | 22.5 | 15.8 | 25.9 |
| 2016-07-01 6:44 | 21.1 | 23.4 | 23.8 | 21.3 | 22.6 | 24.1 | 25.6 | 22.8 | 15.9 | 25.9 |
| 2016-07-01 7:14 | 21.6 | 23.6 | 23.8 | 21.8 | 23.1 | 25.3 | 26.2 | 23.2 | 16.2 | 26 |
| 2016-07-01 7:44 | 20.8 | 23.1 | 23.7 | 21.4 | 22.7 | 24 | 25.8 | 22.8 | 16 | 26 |
| 2016-07-01 8:14 | 21.4 | 23.4 | 23.7 | 21.6 | 22.9 | 24.4 | 25.9 | 23 | 16.2 | 26 |
| 2016-07-01 8:44 | 20.8 | 23.1 | 23.6 | 21.9 | 23.4 | 24.4 | 26.4 | 23.1 | 16.3 | 26.1 |
| 2016-07-01 9:14 | 21.3 | 23.6 | 23.4 | 21.9 | 23.8 | 25.3 | 26.6 | 23.2 | 16.6 | 26.3 |
| 2016-07-01 9:44 | 21.2 | 23.7 | 22.8 | 20.8 | 23 | 25.3 | 26.2 | 23 | 15.1 | 26.2 |
| 2016-07-01 10:14 | 21 | 23.6 | 23.9 | 20.9 | 22.3 | 24.9 | 26 | 23.1 | 15.4 | 26.3 |
| 2016-07-01 10:44 | 21.3 | 23.4 | 24 | 20.9 | 21.8 | 24.3 | 25.4 | 23.1 | 21 | 26.2 |
| 2016-07-01 11:14 | 20.8 | 23.8 | 23.4 | 22.9 | 20.7 | 24.5 | 17 | 24.3 | 16.9 | 25.9 |
| 2016-07-01 11:44 | 20.6 | 22.6 | 23.1 | 23 | 22 | 24.4 | 19.6 | 24.8 | 17.6 | 25.7 |
| 2016-07-01 12:14 | 20.4 | 22.7 | 22.7 | 22.7 | 21.9 | 23.7 | 17.8 | 24.7 | 17.9 | 25.6 |
| 2016-07-01 12:44 | 20.7 | 22.6 | 22.6 | 22.8 | 21.9 | 23.8 | 19 | 24.7 | 20 | 25.4 |
| 2016-07-01 13:14 | 20.9 | 22.5 | 22.1 | 22.6 | 21.5 | 23.4 | 16.8 | 24.9 | 18.8 | 25.2 |
| 2016-07-01 13:44 | 20.5 | 23.1 | 21.5 | 20.8 | 22 | 24 | 15 | 24 | 13.8 | 24.9 |

표 12 2016년 피복 0mm 측정 온도 예시(SC21 ~ SC24)

| 시간 | SC21 | SC22 | SC23 | SC24 |
|------------------|------|------|------|------|
| 2016-07-01 0:14 | 27.2 | 23.3 | 24.2 | 14.5 |
| 2016-07-01 0:44 | 27 | 23.1 | 24.2 | 14.6 |
| 2016-07-01 1:14 | 26.7 | 23.3 | 24.2 | 14.9 |
| 2016-07-01 1:44 | 26.3 | 23.4 | 24.1 | 14.5 |
| 2016-07-01 2:14 | 26.3 | 23.7 | 24.3 | 14.8 |
| 2016-07-01 2:44 | 26 | 23.5 | 22.9 | 15.1 |
| 2016-07-01 3:14 | 26 | 23.6 | 22.2 | 14.7 |
| 2016-07-01 3:44 | 25.8 | 23.6 | 23.6 | 14.1 |
| 2016-07-01 4:14 | 25.6 | 23.4 | 24.3 | 14.4 |
| 2016-07-01 4:44 | 25.3 | 23.2 | 23.7 | 14.3 |
| 2016-07-01 5:14 | 25.5 | 23.6 | 23.9 | 14.8 |
| 2016-07-01 5:44 | 25.3 | 23.6 | 24 | 15.5 |
| 2016-07-01 6:14 | 25.3 | 24.3 | 24.1 | 15.6 |
| 2016-07-01 6:44 | 25.3 | 24.3 | 24.2 | 15.3 |
| 2016-07-01 7:14 | 25.3 | 24.5 | 24.4 | 16.1 |
| 2016-07-01 7:44 | 25.3 | 24.5 | 24.1 | 15.1 |
| 2016-07-01 8:14 | 25.2 | 24.5 | 24.5 | 15.8 |
| 2016-07-01 8:44 | 25.3 | 24.9 | 24.6 | 16.2 |
| 2016-07-01 9:14 | 25.4 | 25.2 | 24.8 | 15.9 |
| 2016-07-01 9:44 | 25.4 | 25.1 | 21.5 | 13.6 |
| 2016-07-01 10:14 | 25.4 | 24.8 | 24.3 | 15.6 |
| 2016-07-01 10:44 | 25.3 | 24.7 | 24 | 23.6 |
| 2016-07-01 11:14 | 24.9 | 24.4 | 24.5 | 24.7 |
| 2016-07-01 11:44 | 24.8 | 24.3 | 24.9 | 24.8 |
| 2016-07-01 12:14 | 24.8 | 24.3 | 25.2 | 24.8 |
| 2016-07-01 12:44 | 24.5 | 24.1 | 24.9 | 24.4 |
| 2016-07-01 13:14 | 24.6 | 24.3 | 24.9 | 24.7 |
| 2016-07-01 13:44 | 24.1 | 23.7 | 24.2 | 23.1 |

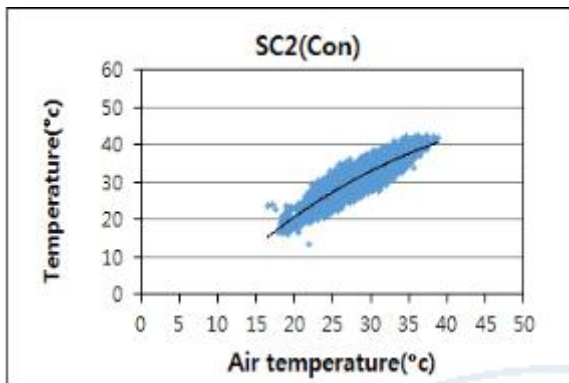


그림 21 0mm SC2지점 온도분포

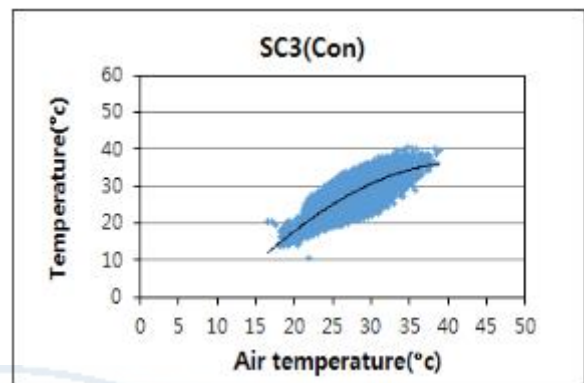


그림 22 0mm SC3지점 온도분포

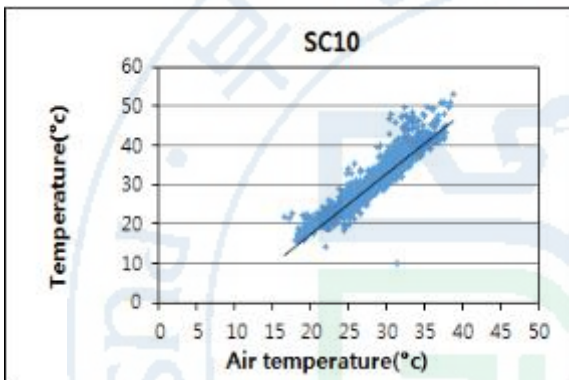


그림 23 0mm SC10지점 온도분포

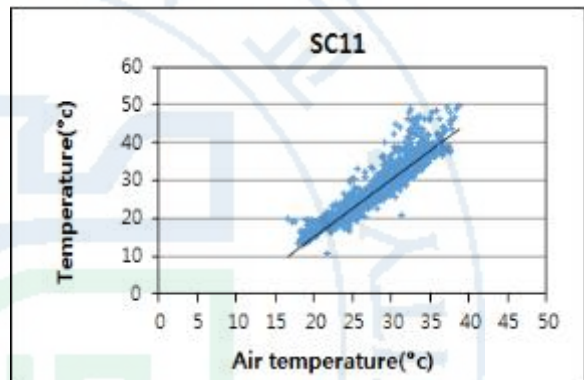


그림 24 0mm SC11지점 온도분포

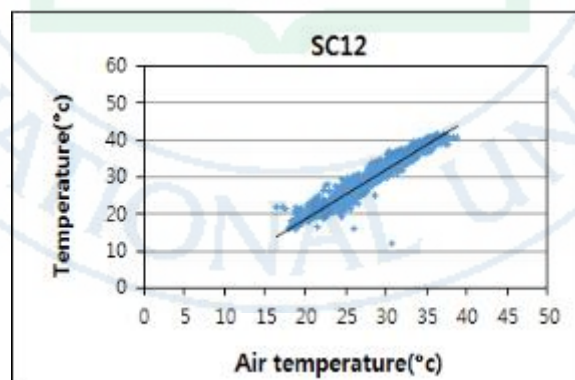


그림 25 0mm SC12지점 온도분포

표 13 2016년 피복 0mm 5개 지점 추세선

| 지점 | 추세선 | R ² |
|------|-----------------------------------------|----------------|
| SC2 | $y=0.0001x^3-0.0282x^2+2.4376x-17.696$ | 0.7594 |
| SC3 | $y=-0.0003x^3-0.0111x^2+2.3911x-23.246$ | 0.6452 |
| SC10 | $y=1.5398x-13.206$ | 0.9042 |
| SC11 | $y=1.5054x-14.893$ | 0.8853 |
| SC12 | $y=1.3547x-8.6553$ | 0.9363 |

아래 표 14, 표 15는 2016년도 2017년도 측정한 피복 0mm 시험체의 측정 기간 동안의 평균과 표준오차를 나타낸 표이다. 표 14에서 SC1 ~ SC5는 콘크리트 슬래브 속 온도계이고 SC6 ~ SC11은 왼쪽 웹브에 붙은 온도 측정계, SC12 ~ SC17은 오른쪽 웹브에 붙은 온도측정계이다. SC18 ~ SC21 은 상하부 플랜지에 SC23은 대기온도 측정계, SC24는 콘크리트 슬래브 표면에 부착된 최상부 온도계이지이다. 표 15의 SC1 ~ SC5는 콘크리트 슬래브 속 온도계이고 SC6 ~ SC9은 왼쪽 웹브에 붙은 온도 측정계, SC10 ~ SC13은 오른쪽 웹브에 붙은 온도측정계이다. SC17은 대기온도 측정계이다.

측정 기간 동안 각 지점의 평균온도와 표준오차를 보면 측정 기간 동안 평균 23.7℃ ~ 30.8℃ 범위를 보이고 표준오차는 0.8℃ ~ 5.1℃의 범위를 보이는 것을 알 수 있다.

표 14 2016 피복 0mm 각 지점의 평균,
표준편차

| 지점 | 평균 | 표준오차 |
|------|------|------|
| SC1 | 30.8 | 2.0 |
| SC2 | 29.5 | 2.4 |
| SC3 | 27 | 3.2 |
| SC4 | 29.0 | 3.1 |
| SC6 | 29.0 | 1.3 |
| SC7 | 27.0 | 2.1 |
| SC8 | 25.9 | 5.1 |
| SC9 | 28.1 | 2.0 |
| SC10 | 28.5 | 1.9 |
| SC11 | 25.9 | 2.0 |
| SC12 | 28.1 | 1.3 |
| SC13 | 28.1 | 2.5 |
| SC14 | 26.7 | 3.2 |
| SC15 | 28.3 | 3.3 |
| SC16 | 29.3 | 3.4 |
| SC17 | 25.4 | 5.1 |
| SC18 | 27.8 | 1.6 |
| SC19 | 23.7 | 4.1 |
| SC20 | 30.0 | 1.7 |
| SC21 | 29.0 | 1.8 |
| SC22 | 27.2 | 1.8 |
| SC23 | 27.1 | 0.0 |
| SC24 | 28.0 | 3.4 |

표 15 2017 피복 0mm 각 지점의 평균,
표준편차

| 지점 | 평균 | 표준오차 |
|------|------|------|
| SC1 | 29.6 | 2.9 |
| SC2 | 30.0 | 2.9 |
| SC3 | 29.7 | 2.7 |
| SC4 | 30.0 | 2.1 |
| SC5 | 29.4 | 1.2 |
| SC6 | 29.8 | 1.5 |
| SC7 | 29.7 | 1.3 |
| SC8 | 29.1 | 2.2 |
| SC9 | 29.4 | 2.6 |
| SC10 | 29.7 | 1.3 |
| SC11 | 43.8 | 3.0 |
| SC12 | 30.6 | 3.2 |
| SC13 | 30.0 | 3.1 |
| SC14 | 30.0 | 2.1 |
| SC15 | 29.6 | 1.5 |
| SC16 | 28.7 | 0.8 |
| SC17 | 27.8 | 0.0 |

나. 유효온도 설계기준

Euro code 온도 조정치를 본 연구의 시험체에 대입하면 아래 표 16과 같다. 시험체의 피복이 없는 모델은 0°C, 50mm 시험체는 +2°C, 100mm 시험체는 0°C, 150mm 시험체는 -2°C의 온도조정이 필요하다. 표 17은 온도조정을 한 유효온도 설계기준을 나타낸 것이고, 그림 26은 표 17을 그래프로 나타낸 것이다. 상부 피복 50mm에서 교량의 유효온도가 가장 높고, 상부 피복 150mm에서 교량의 유효온도가 가장 낮다. 상부피복이 없는 시험체와 피복 100mm 시험체는 유효온도 값이 같다.

표 16 시험체 피복두께에 따른 온도 조정치

| | 온도 조정치(°C) |
|------------|------------|
| 처리 없음 | 0 |
| 50mm 오버레이 | +2 |
| 100mm 오버레이 | 0 |
| 150mm 오버레이 | -2 |

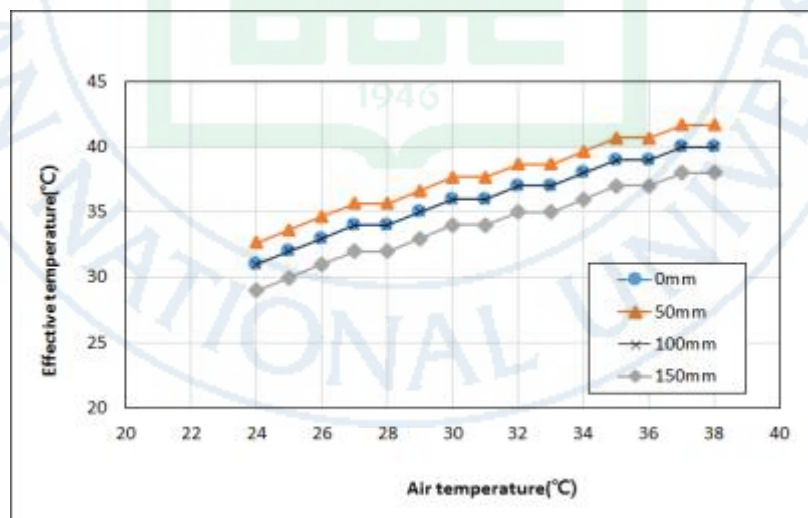


그림 26 피복두께에 따른 유효온도 설계기준

표 17 피복두께에 따른 유효온도 설계기준

| 대기온도 | Euro code | | | |
|------|-----------|------|-------|-------|
| | 0mm | 50mm | 100mm | 150mm |
| 38 | 40 | 42 | 40 | 38 |
| 37 | 40 | 42 | 40 | 38 |
| 36 | 39 | 41 | 39 | 37 |
| 35 | 39 | 41 | 39 | 37 |
| 34 | 38 | 40 | 38 | 36 |
| 33 | 37 | 39 | 37 | 35 |
| 32 | 37 | 39 | 37 | 35 |
| 31 | 36 | 38 | 36 | 34 |
| 30 | 36 | 38 | 36 | 34 |
| 29 | 35 | 37 | 35 | 33 |
| 28 | 34 | 36 | 34 | 32 |
| 27 | 34 | 36 | 34 | 32 |
| 26 | 33 | 35 | 33 | 31 |
| 25 | 32 | 34 | 32 | 30 |
| 24 | 31 | 33 | 31 | 29 |

다. 유효온도 분석방법

유효온도 분석에는 티센가중법(Thiessen method)을 사용하였다(식 1). 이는 면적이 가중치를 두어 값을 산정하는 방법으로 산술평균법 보다 정확하고 적용방법에 객관성이 있다는 장점이 있다. 유효온도의 산정을 위해 각 지점의 추세선을 나타내었다. 2016년 0mm 시험체의 각 지점별 추세선을 나타내면 아래 표 18과 같다. 각 지점의 추세선 식의 x값에 Euro code 설계기준 대기온도 범위인 24°C~38°C 온도를 넣어 각 대기온도별 평균온도를 산정하면 표 19와 같다.

$$T = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} A_i T_i}{\sum_{i=1}^{i=n} A_i} \quad (1)$$

표 18 2016년 0mm 추세선

| 지점 | 추세선 | R ² |
|------|-------------------------------------------------|----------------|
| SC1 | $y = -0.0009x^3 + 0.0727x^2 - 0.6586x - 13.097$ | 0.8502 |
| SC2 | $y = -0.0001x^3 - 0.0282x^2 + 2.4376x - 17.696$ | 0.7594 |
| SC3 | $y = -0.0003x^3 - 0.0111x^2 + 2.3911x - 23.246$ | 0.6452 |
| SC4 | $y = 0.0012x^3 - 0.141x^2 + 5.836x - 49.661$ | 0.5812 |
| SC6 | $y = 1.2548x - 5.0361$ | 0.9262 |
| SC7 | $y = 1.2905x - 6.482$ | 0.7791 |
| SC8 | $y = 1.4833x - 14.285$ | 0.5452 |
| SC9 | $y = 1.5512x - 13.938$ | 0.8980 |
| SC10 | $y = 1.5398x - 13.206$ | 0.9042 |
| SC11 | $y = 1.5054x - 14.893$ | 0.8853 |
| SC12 | $y = 1.3547x - 8.6553$ | 0.9363 |
| SC13 | $y = 1.5393x - 13.613$ | 0.8441 |
| SC14 | $y = 1.4766x - 13.367$ | 0.7580 |
| SC15 | $y = 1.4394x - 10.693$ | 0.7278 |
| SC16 | $y = 1.5117x - 11.646$ | 0.7343 |
| SC17 | $y = 1.5508x - 16.669$ | 0.5654 |
| SC18 | $y = 1.1761x - 4.0787$ | 0.8908 |
| SC19 | $y = 1.3661x - 13.37$ | 0.6183 |
| SC20 | $y = 1.1361x - 0.7966$ | 0.8585 |
| SC21 | $y = 1.1277x - 1.6353$ | 0.8524 |

표 19 각 지점별 추세선 평균온도

| 대기온도 | SC1 | SC2 | SC3 | SC4 | ... | SC20 | SC21 |
|------|------|------|------|------|-----|------|------|
| 38 | 43.7 | 39.7 | 35.1 | 34.3 | | 42.4 | 41.2 |
| 37 | 42.7 | 39.0 | 34.8 | 34.0 | | 41.2 | 40.1 |
| 36 | 41.6 | 38.2 | 34.5 | 33.7 | | 40.1 | 39.0 |
| 35 | 40.5 | 37.4 | 34.0 | 33.3 | | 39.0 | 37.8 |
| 34 | 39.4 | 36.5 | 33.4 | 32.9 | | 37.8 | 36.7 |
| 33 | 38.2 | 35.6 | 32.8 | 32.5 | | 36.7 | 35.6 |
| 32 | 37.0 | 34.7 | 32.1 | 32.0 | | 35.6 | 34.5 |
| 31 | 35.7 | 33.7 | 31.3 | 31.5 | | 34.4 | 33.3 |
| 30 | 34.5 | 32.8 | 30.4 | 30.9 | ... | 33.3 | 32.2 |
| 29 | 33.2 | 31.7 | 29.4 | 30.3 | | 32.2 | 31.1 |
| 28 | 31.9 | 30.6 | 28.4 | 29.5 | | 31.0 | 29.9 |
| 27 | 30.6 | 29.5 | 27.3 | 28.7 | | 29.9 | 28.8 |
| 26 | 29.3 | 28.4 | 26.1 | 27.9 | | 28.7 | 27.7 |
| 25 | 28.0 | 27.2 | 24.9 | 26.9 | | 27.6 | 26.6 |
| 24 | 26.7 | 25.9 | 23.6 | 25.8 | | 26.5 | 25.4 |
| 23 | 25.5 | 24.7 | 22.2 | 24.6 | | 25.3 | 24.3 |
| 22 | 24.2 | 23.3 | 20.8 | 23.3 | | 24.2 | 23.2 |
| 21 | 23.0 | 22.0 | 19.3 | 21.8 | | 23.1 | 22.0 |
| 20 | 21.8 | 20.6 | 17.7 | 20.3 | ... | 21.9 | 20.9 |

위의 표 19에 나타난 추세선 평균온도에 각 지점별 표준오차를 더해준다. 이는 Euro code는 오랜 시간 축전된 데이터로 유효온도를 산정한 것과 달리 본 연구에서는 측정기간이 비교적 짧기 때문에 데이터의 극값을 이용하여 유효온도를 구하고자 하기 위함이다. 그림 27, 그림 28은 2016년 0mm 시험체 온도 분포 데이터에 표준오차만큼을 올려준 것을 나타낸 그림이다. 이렇게 각 지점에 표준오차를 나타내면 표 20과 같고 이를 더해주면 표 21과 같다.

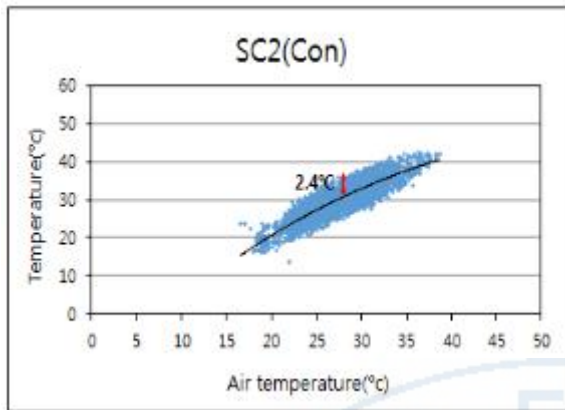


그림 27 2016년 0mm SC2

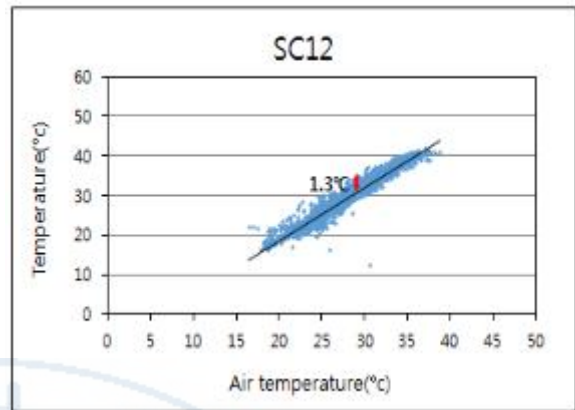


그림 28 2016년 0mm SC12

표 20 2016년 0mm 표준오차

| 지점 | 표준오차(°C) | 지점 | 표준오차(°C) |
|------|----------|------|----------|
| SC1 | 2.0 | SC12 | 1.3 |
| SC2 | 2.4 | SC13 | 2.5 |
| SC3 | 3.2 | SC14 | 3.2 |
| SC4 | 3.1 | SC15 | 3.3 |
| SC6 | 1.3 | SC16 | 3.4 |
| SC7 | 2.1 | SC17 | 5.1 |
| SC8 | 5.1 | SC18 | 1.6 |
| SC9 | 2.0 | SC19 | 4.1 |
| SC10 | 1.9 | SC20 | 1.7 |
| SC11 | 2.0 | SC21 | 1.8 |

표 21 표준오차를 고려한 각 지점별 산정온도

| 대기온도 | SC1 | SC2 | SC3 | SC4 | ... | SC20 | SC21 |
|------|------|------|------|------|-----|------|------|
| 38 | 45.7 | 42.1 | 38.3 | 37.5 | | 44.1 | 43.0 |
| 37 | 44.7 | 41.4 | 38.0 | 37.1 | | 43.0 | 41.9 |
| 36 | 43.6 | 40.6 | 37.6 | 36.8 | | 41.8 | 40.7 |
| 35 | 42.5 | 39.8 | 37.2 | 36.4 | | 40.7 | 39.6 |
| 34 | 41.4 | 38.9 | 36.6 | 36.0 | | 39.6 | 38.5 |
| 33 | 40.2 | 38.1 | 36.0 | 35.6 | | 38.4 | 37.4 |
| 32 | 39.0 | 37.1 | 35.3 | 35.1 | | 37.3 | 36.2 |
| 31 | 37.7 | 36.2 | 34.5 | 34.6 | | 36.2 | 35.1 |
| 30 | 36.5 | 35.2 | 33.6 | 34.0 | ... | 35.0 | 34.0 |
| 29 | 35.2 | 34.1 | 32.6 | 33.4 | | 33.9 | 32.8 |
| 28 | 33.9 | 33.1 | 31.6 | 32.7 | | 32.8 | 31.7 |
| 27 | 32.6 | 32.0 | 30.5 | 31.8 | | 31.6 | 30.6 |
| 26 | 31.3 | 30.8 | 29.3 | 31.0 | | 30.5 | 29.5 |
| 25 | 30.0 | 29.6 | 28.1 | 30.0 | | 29.4 | 28.3 |
| 24 | 28.7 | 28.4 | 26.8 | 28.9 | | 28.2 | 27.2 |
| 23 | 27.5 | 27.1 | 25.4 | 27.7 | | 27.1 | 26.1 |
| 22 | 26.2 | 25.8 | 24.0 | 26.4 | | 25.9 | 25.0 |
| 21 | 25.0 | 24.4 | 22.5 | 24.9 | | 24.8 | 23.8 |
| 20 | 23.8 | 23.0 | 20.9 | 23.4 | ... | 23.7 | 22.7 |

각 지점별 유효온도를 티센가중법으로 산정하기 위해 표준오차를 고려한 각 지점별 추세선 평균온도(표 21)에 각 지점별 면적을 곱한다. 지점별 면적은 아래 표 22와 같다.

표 22 각 지점별 면적

| | SC1 | SC2 | SC3 | SC4 | SC6 | SC7 | SC8 |
|------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|------|
| Area | 200000 | 200000 | 200000 | 200000 | 3000 | 2500 | 4500 |
| | SC9 | SC10 | SC11 | SC12 | SC13 | SC14 | SC15 |
| Area | 4500 | 2500 | 3000 | 3000 | 2500 | 4500 | 4500 |
| | SC16 | SC17 | SC18 | SC19 | SC20 | SC21 | |
| Area | 2500 | 3000 | 10000 | 10000 | 10000 | 10000 | |

라. 유효온도 분석

1) 2016,2017 0mm 비교

0mm 시험체는 2년간 온도를 측정하였기 때문에 2년 치의 유효온도를 산정 할 수 있다. 아래 표 23은 2016년과 2017년의 7-8월 기상청 대기온도와 2개월간의 평균온도를 나타낸 것으로 2년간의 온도 편차는 크지 않고 유사하다는 것을 알 수 있다. 그림 29는 2016년과 2017년 각각의 유효온도 결과를 나타낸 그래프로 유효온도 역시 2년간의 편차는 크지 않고 유사하게 산정되었다. 이에 0mm 유효온도는 2016년 2017년의 값을 평균하여 유효온도를 산정하였다.

표 23 2016,2017년의 7-8월 기상청 대기온도

| 기상청 | 7월 | 8월 | 평균 |
|------|------|------|------|
| 2016 | 30.9 | 33.5 | 32.2 |
| 2017 | 32.4 | 32.9 | 32.7 |

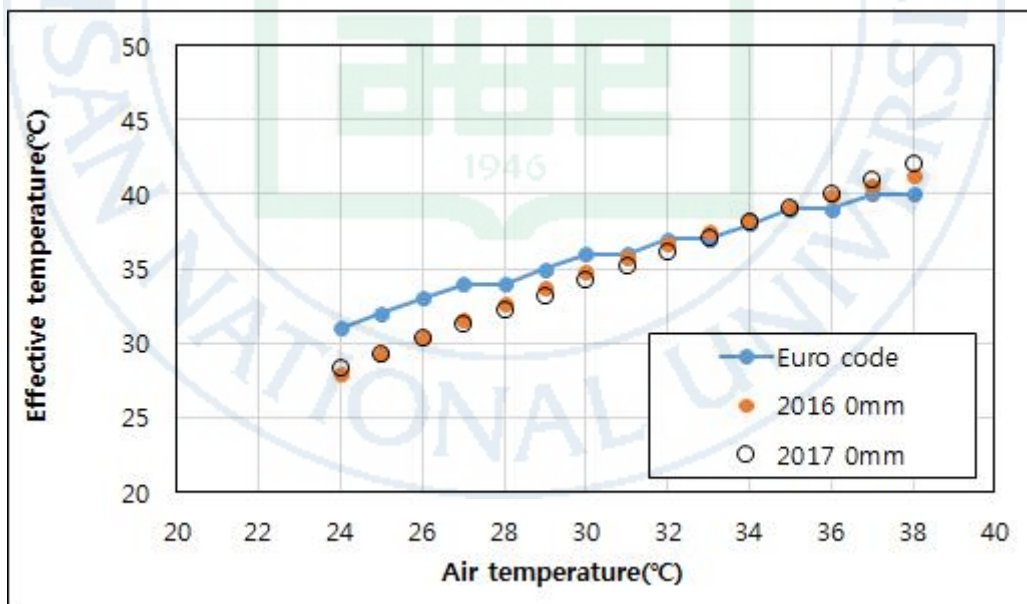


그림 29 2016년, 2017년 0mm 유효온도 그래프

2) 유효온도 분석결과

개개의 온도와 면적을 곱하고 전체 면적으로 나누어 주는 티센가중법을 사용하여 산정한 유효온도 결과는 아래 표 24와 같다. 표 24는 각 상부 피복 두께별로 Euro code와 유효온도를 나타내었으며, 피복 0mm 유효온도는 2016 - 2017년의 유효온도를 평균하여 하나의 결과로 나타내었다. 피복 0mm 시험체는 대기온도 38°C에서 Euro code보다 1.8°C 높게 산정되었다. 피복 50mm, 100mm, 150mm 시험체는 각각 대기온도 38°C에서 Euro code보다 2.1°C, 2.2°C, 3.1°C 높게 산정된 것을 알 수 있다.

표 24 유효온도 분석결과

| | Box A | | Box B | | Box C | | Box D | |
|------|-----------|------|-----------|------|-----------|-------|-----------|-------|
| 대기온도 | Euro code | 0mm | Euro code | 50mm | Euro code | 100mm | Euro code | 150mm |
| 38 | 40 | 41.8 | 42 | 44.1 | 40 | 42.2 | 38 | 41.1 |
| 37 | 40 | 40.8 | 42 | 43.6 | 40 | 41.9 | 38 | 40.5 |
| 36 | 39 | 40.0 | 41 | 43.0 | 39 | 41.5 | 37 | 39.9 |
| 35 | 39 | 39.1 | 41 | 42.3 | 39 | 41.1 | 37 | 39.3 |
| 34 | 38 | 38.2 | 40 | 41.7 | 38 | 40.7 | 36 | 38.6 |
| 33 | 37 | 37.3 | 39 | 40.9 | 37 | 40.3 | 35 | 38.0 |
| 32 | 37 | 36.4 | 39 | 40.1 | 37 | 39.7 | 35 | 37.4 |
| 31 | 36 | 35.5 | 38 | 39.3 | 36 | 39.2 | 34 | 36.7 |
| 30 | 36 | 34.5 | 38 | 38.3 | 36 | 38.5 | 34 | 36.1 |
| 29 | 35 | 33.5 | 37 | 37.3 | 35 | 37.8 | 33 | 35.5 |
| 28 | 34 | 32.5 | 36 | 36.1 | 34 | 37.0 | 32 | 34.9 |
| 27 | 34 | 31.4 | 36 | 34.9 | 34 | 36.1 | 32 | 34.2 |
| 26 | 33 | 30.4 | 35 | 33.5 | 33 | 35.1 | 31 | 33.6 |
| 25 | 33 | 29.3 | 34 | 32.0 | 33 | 33.9 | 31 | 33.0 |
| 24 | 32 | 28.2 | 33 | 30.4 | 32 | 32.6 | 30 | 32.4 |

그림 30 ~ 그림33은 피복 두께별 유효온도를 Euro code와 비교하여 그래프로 나타낸 것이다. 피복 0mm 시험체의 유효온도는 대기온도 32°C 이하의 온도에서 Euro code보다 낮게 산정되었으며 산정된 유효온도와 Euro code 사이에 약 4.2%의 오차를 보인다. 피복 50mm 시험체의 유효온도는 대기온도 27°C 이하의 온도에서 Euro

code보다 낮게 산정되었으며 약 4.1%의 오차율을 보인다. 피복 100mm 시험체의 유효 온도는 대기온도 전 구간에서 Euro code보다 높게 산정되었으며 약 6.4%의 오차율을 보인다. 피복 150mm 시험체의 유효온도 역시 대기온도 전 구간에서 Euro code보다 높게 산정되었으며 약 8.0%의 오차율을 보인다.

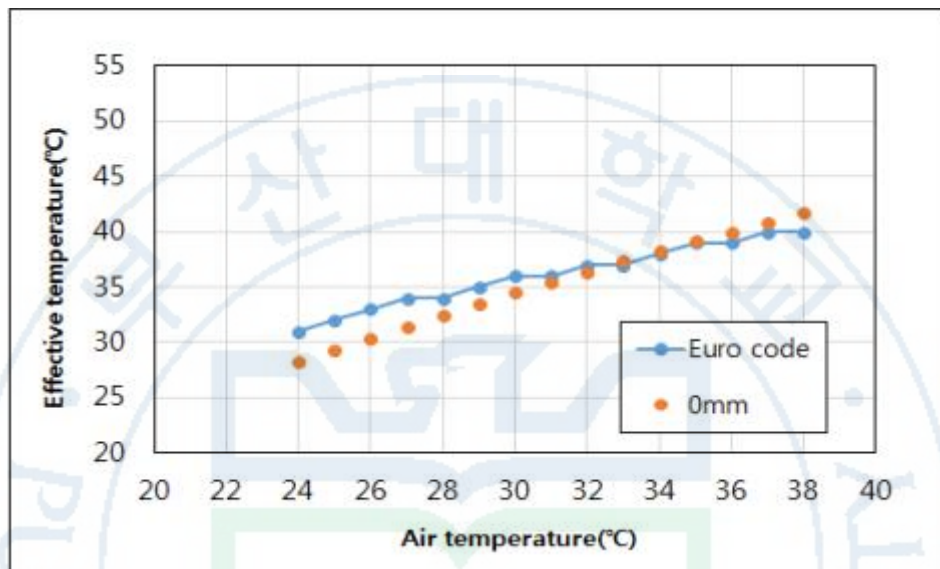


그림 30 0mm 유효온도 그래프

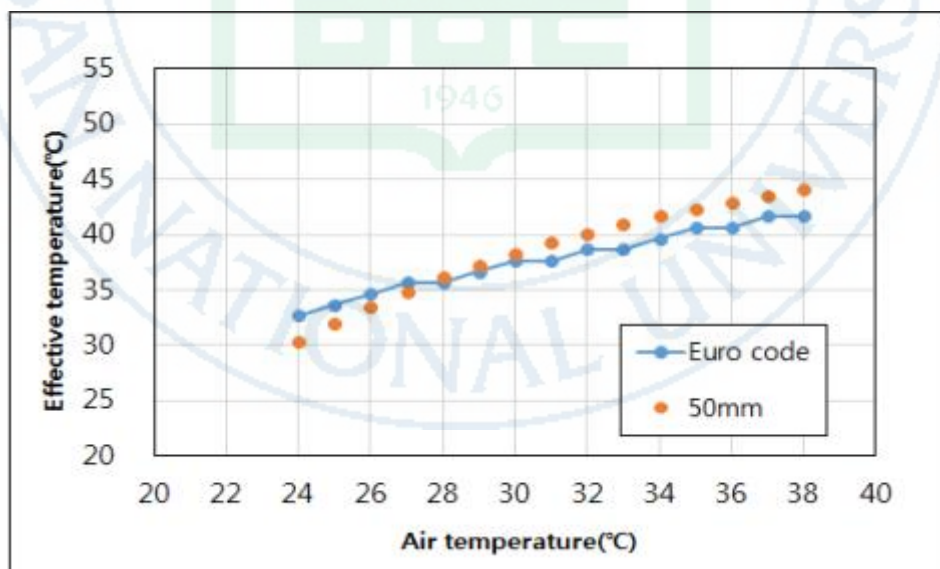


그림 31 50mm 유효온도 그래프

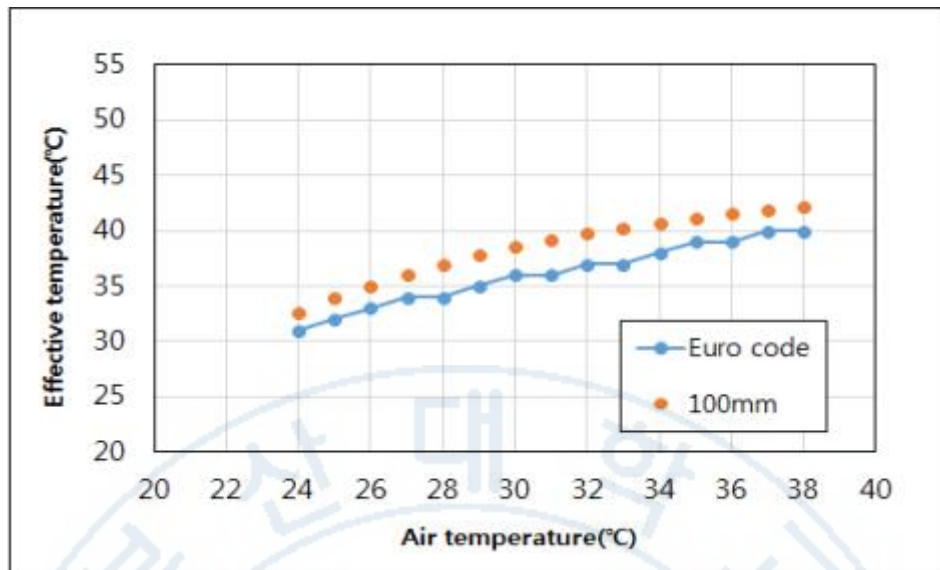


그림 32 100mm 유효온도 그래프

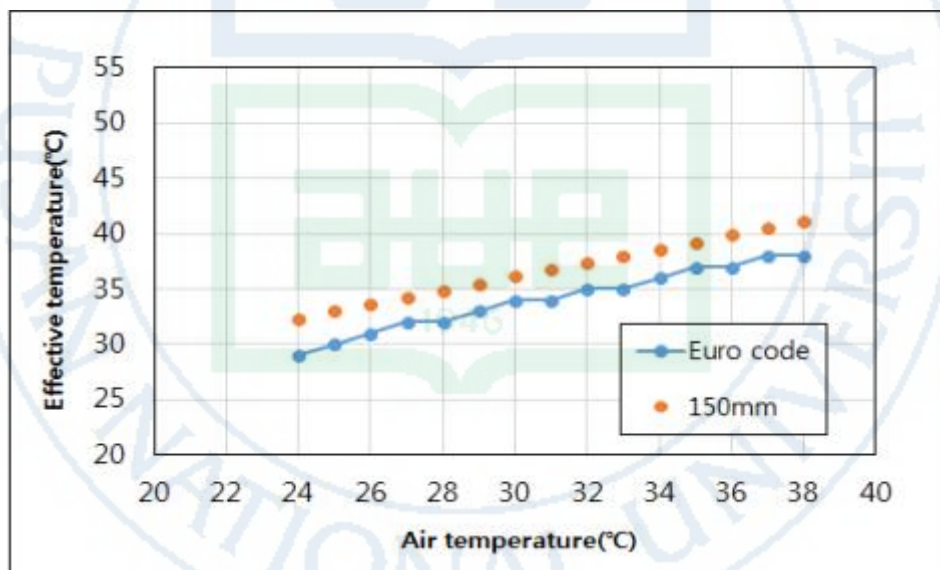


그림 33 150mm 유효온도 그래프

3. 피복두께별 상·하연 온도차 산정

가. 온도차 설계기준

그림 34는 Euro code 온도차 설계기준 중에서 Group 3형식을 나타낸 것이다. 이를 보면 최상단에서 온도차는 T_1 이고 이 값은 피복두께에 따라 다른 값을 가진다. 그리고 최상단에서 120mm 내려온 지점에서 온도차는 4°C , 최상단에서 600mm 내려온 지점에서 온도차는 0°C 이다. 그 사이 구간은 선형처리 되어있다.

표 25는 피복두께에 따른 T_1 을 나타낸 것이고 피복 50mm에서 온도차는 18°C 로 가장 크고, 피복 150mm에서 온도차는 10.5°C 로 같은 형식의 교량에서도 피복두께에 따라 7.5°C 까지 온도차이가 나는 것을 알 수 있다. 또한 피복두께가 얇은 경우 피복이 없는 시험체보다 상·하연 온도차가 커지지만 피복두께가 두꺼워지면 교량내의 상·하연 온도차이가 적게 나는 것을 알 수 있다.

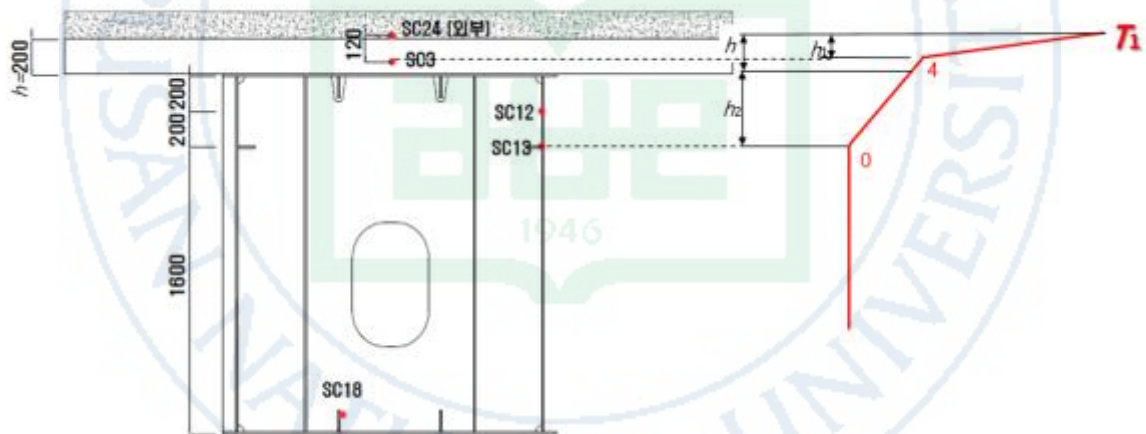


그림 34 Group 3 형식의 Euro code 온도차 설계기준

표 25 피복 두께에 따른 T1

| Depth of slab(<i>h</i>) | Surfacing thickness | Positive temperature difference |
|---------------------------------|------------------------|---------------------------------------|
| | | T_1 |
| m | mm | $^{\circ}C$ |
| 0.2 | unsurfaced | 16.5 |
| | 50 | 18 |
| | 100 | 13 |
| | 150 | 10.5 |

나. 측정예시

Euro code 설계기준에 따라 온도차 산정에 필요한 5개의 지점은 아래 그림과 같다. 아래 그림 35 ~ 그림 39는 온도차를 산정하기 위해 필요한 5개 지점의 온도분포를 나타낸 것으로 2016년 0mm의 5개 지점의 모습이다. 그림은 순서대로 시험체 최하단에서부터 2200mm, 2080mm, 1800mm, 1600mm, 0mm 위치에서의 데이터이다.

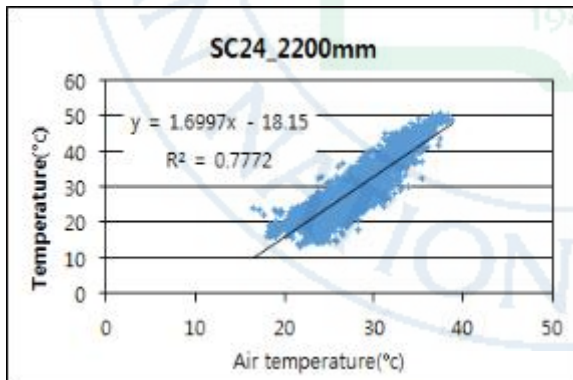


그림 35 2016년 0mm SC24 온도데이터

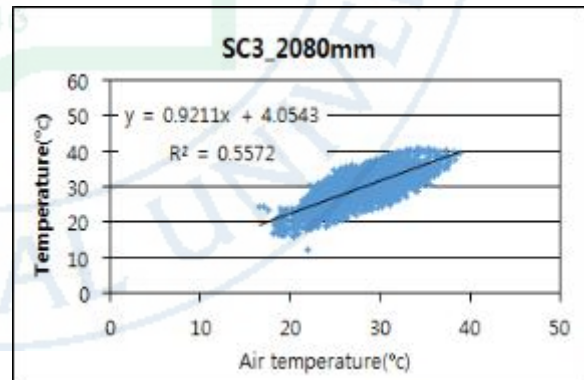


그림 36 2016년 0mm SC3 온도데이터

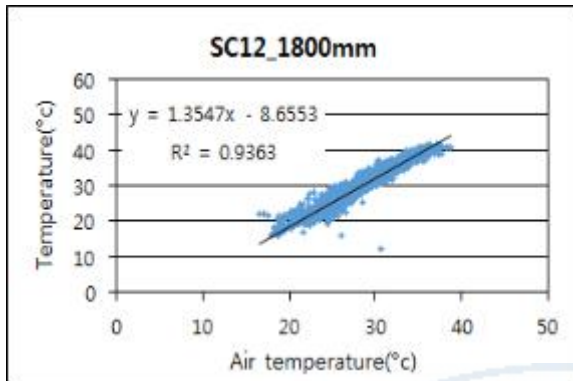


그림 37 2016년 0mm SC12 온도데이터

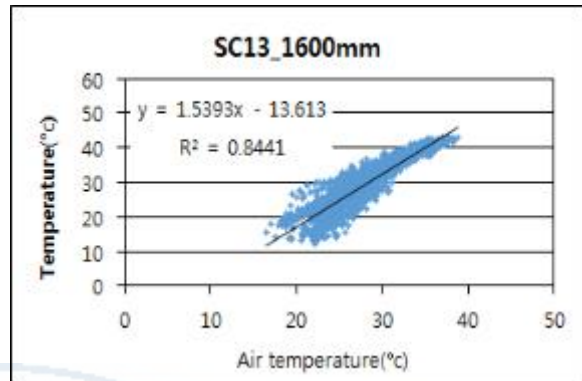


그림 38 2016년 0mm SC13 온도데이터

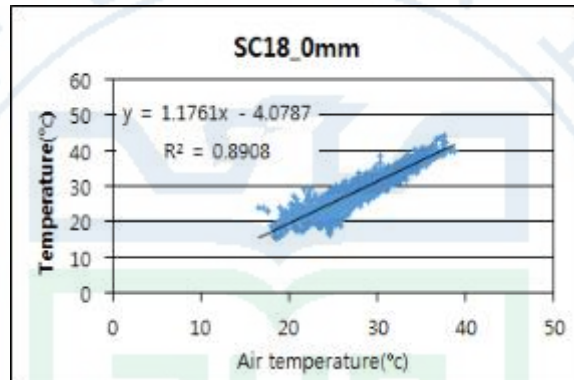


그림 39 2016년 0mm SC18 온도데이터

다. 기준 대기온도 설정

온도차 분석 역시 유효온도를 분석할 때와 마찬가지로 측정기간이 비교적 짧기 때문에 데이터의 표준편차를 이용하여 온도차를 산정하여 설계시의 안정을 도모한다. 이에 2016년 측정 기간 동안의 평균 대기온도 27.1°C에서 온도차를 산정하는 것이 아니라 평균 대기온도에 표준편차를 더해준 30.9°C의 대기온도에서 온도차를 산정한다. 아래 그림 40은 2016년 0mm 시험체에서 SC24번의 온도분포 데이터에 평균 대기온도와 평균 대기온도에 표준편차를 더해준 대기온도를 표시한 모습이다. 표 26은 2016년도의 평균 대기온도와 표준편차를 나타낸 표이다.

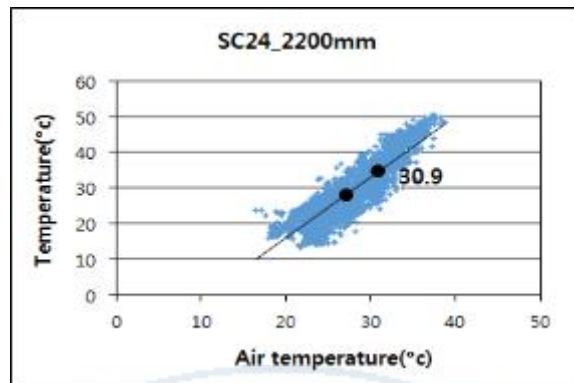


그림 40 온도차 산정을 위한 기준 대기온도의 설정

표 26 2016년 평균대기온도와 표준편차

| 대기온도 | 2016 |
|------------------|------|
| 평균(T) | 27.1 |
| 표준편차(σ) | 3.8 |
| $T + \sigma$ | 30.9 |

라. 온도차 산정방법

온도차는 Euro code설계기준을 바탕으로 시험체 최하단에서부터 2200mm, 2080mm, 1800mm, 1600mm, 0mm 떨어진 지점의 데이터를 이용한다. 아래 그림은 앞서 2016년 0mm 시험체의 5개 지점에 온도차 산정을 위한 데이터를 표시한 모습이다. 온도차산정은 앞서 설정한 대기온도 30.9°C를 x값으로 하고 각 지점의 온도 측정계 값을 y값으로 하여, 같은 대기온도에서 교량의 온도차가 얼마나 나는가를 판단하였다. 그림 41을 보면 최상단 SC24 지점에서 대기온도 30.9°C일 때 가장 높은 실측치는 45°C이다. 그림 45를 보면 최하단 SC18 지점은 대기온도 30.9°C일 때 가장 낮은 실측치는 29.2°C이다. 이에 최상·하단 온도 차이는 15.8°C이다(표 27). 이와 같은 방법으로 5개 시험체의 온도차를 산정하였다.

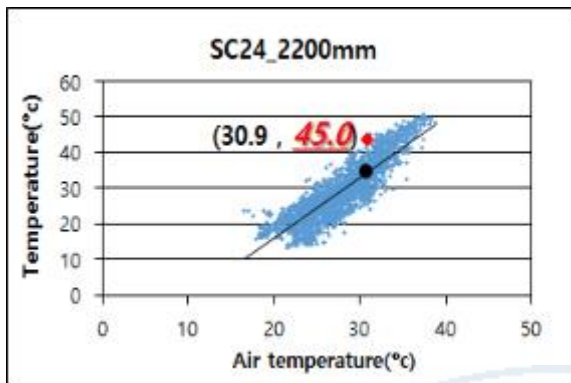


그림 41 온도차 산정을 위한 SC24 온도

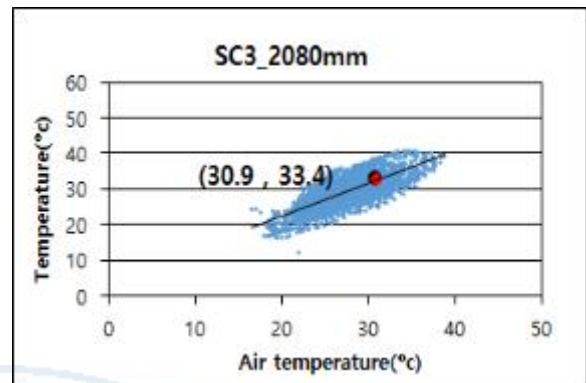


그림 42 온도차 산정을 위한 SC3 온도

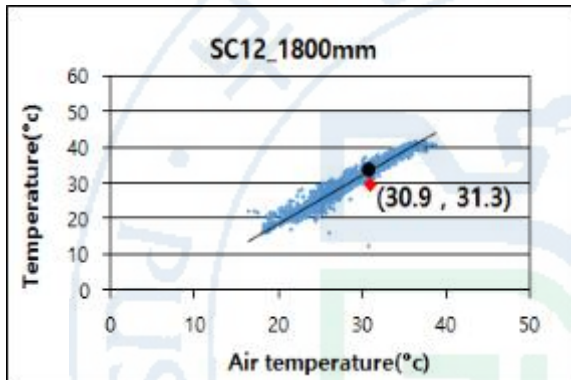


그림 43 온도차 산정을 위한 SC12 온도

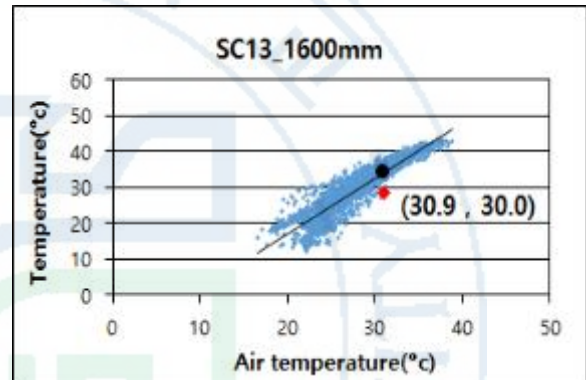


그림 44 온도차 산정을 위한 SC13 온도

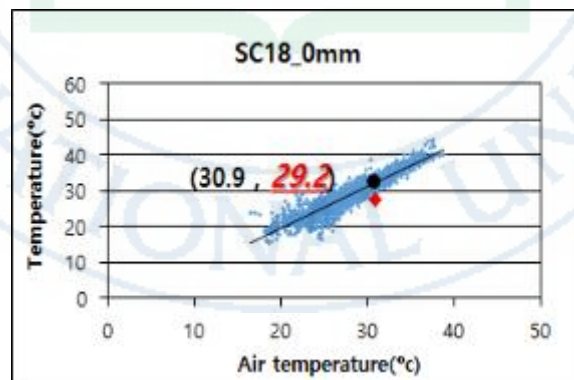


그림 45 온도차 산정을 위한 SC18 온도

표 27 2016년 0mm 상·하연 온도차

| | 피복 0mm |
|-------------|--------|
| 최상단(2200mm) | 45.0℃ |
| 최하단(0mm) | 29.2℃ |
| 온도차 | 15.8℃ |

마. 상·하연 온도차 분석결과

온도차를 산정한 결과는 다음과 같다. 표 28 ~ 표 32는 각 피복두께별 온도차 수치를 나타낸 것으로 그림 46 ~ 그림 50은 각각의 표를 그래프로 나타낸 것이다. 피복 0mm 시험체의 Euro code 상·하연 온도차는 16.5℃이고 본 연구 시험체의 온도차는 2016년에 15.8℃, 2017년에 15.9℃로 각각 0.7℃, 0.6℃정도 낮게 측정되었다. 피복 50mm 모델에서는 Euro code 상·하연 온도차는 18℃ 본 연구 시험체는 16.6℃로 1.4℃정도 낮게 측정되었다. 피복 100mm 모델에서는 Euro code 상·하연 온도차는 13℃ 본 연구 시험체는 11.1℃로 1.4℃정도 낮게 측정되었다. 피복 150mm 모델에서는 Euro code 상·하연 온도차는 10.5℃ 본 연구 시험체는 10.9℃로 0.4℃정도 높게 측정되었다.

1) 2016년 피복 0mm 시험체

표 28 2016년 0mm 온도차 결과

| Height(mm) | 온도경사(TG) | | Height(mm) | 온도경사(TG) | |
|------------|-----------|------|------------|-----------|-----|
| | Euro code | 0mm | | Euro code | 0mm |
| 2200 | 16.5 | 15.8 | 1100 | 0 | 0.6 |
| 2100 | 6.1 | 6.1 | 1000 | 0 | 0.5 |
| 2080 | 4 | 4.2 | 900 | 0 | 0.5 |
| 2000 | 3.3 | 3.6 | 800 | 0 | 0.4 |
| 1900 | 3.3 | 3.5 | 700 | 0 | 0.4 |
| 1800 | 1.7 | 2.1 | 600 | 0 | 0.3 |
| 1700 | 0.8 | 1.5 | 500 | 0 | 0.3 |
| 1600 | 0 | 0.8 | 400 | 0 | 0.2 |
| 1500 | 0 | 0.8 | 300 | 0 | 0.2 |
| 1400 | 0 | 0.7 | 200 | 0 | 0.1 |
| 1300 | 0 | 0.7 | 100 | 0 | 0.1 |
| 1200 | 0 | 0.6 | 0 | 0 | 0 |

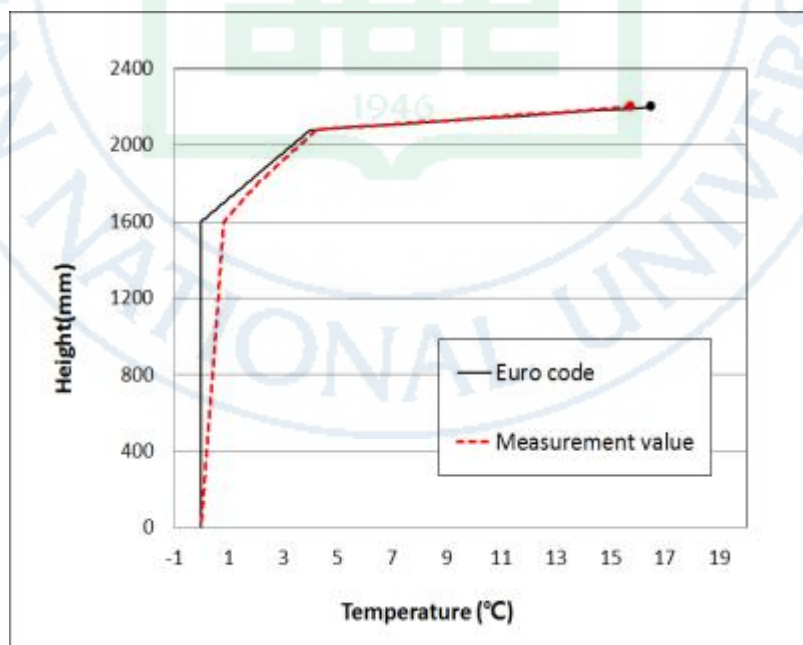


그림 46 2016년 0mm 온도차 그래프

2) 2016년 피복 50mm 시험체

표 29 50mm 온도차 결과

| Height(mm) | 온도경사(TG) | | Height(mm) | 온도경사(TG) | |
|------------|-----------|------|------------|-----------|-----|
| | Euro code | 0mm | | Euro code | 0mm |
| 2200 | 18 | 16.6 | 1100 | 0 | 0.7 |
| 2100 | 6.3 | 6.6 | 1000 | 0 | 0.6 |
| 2080 | 4 | 4.6 | 900 | 0 | 0.5 |
| 2000 | 3.3 | 3.9 | 800 | 0 | 0.5 |
| 1900 | 2.5 | 3.0 | 700 | 0 | 0.4 |
| 1800 | 1.7 | 2.1 | 600 | 0 | 0.4 |
| 1700 | 0.8 | 1.5 | 500 | 0 | 0.3 |
| 1600 | 0 | 1.0 | 400 | 0 | 0.2 |
| 1500 | 0 | 0.9 | 300 | 0 | 0.2 |
| 1400 | 0 | 0.8 | 200 | 0 | 0.1 |
| 1300 | 0 | 0.8 | 100 | 0 | 0.1 |
| 1200 | 0 | 0.7 | 0 | 0 | 0 |

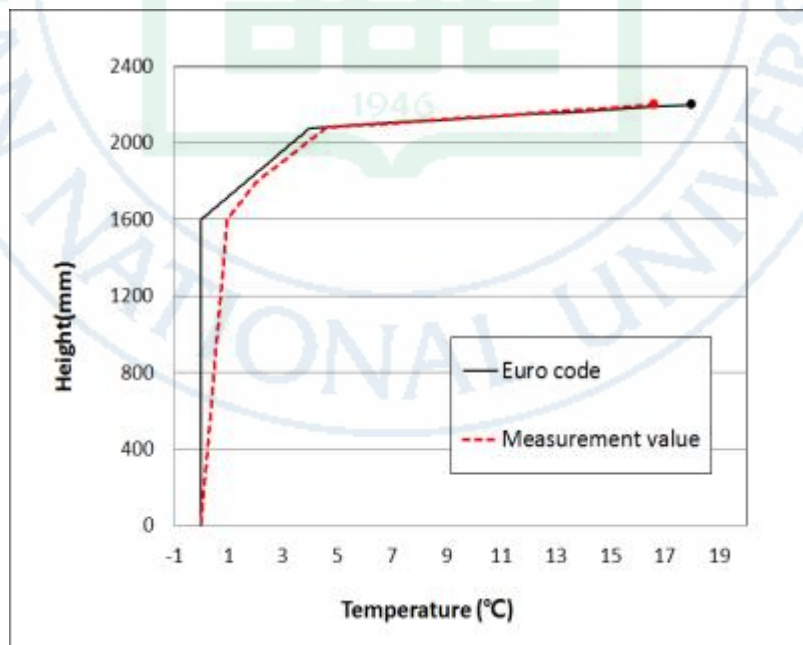


그림 47 2016년 50mm 온도차 그래프

3) 2016년 피복 100mm 시험체

표 30 100mm 온도차 결과

| Height(mm) | 온도경사(TG) | | Height(mm) | 온도경사(TG) | |
|------------|-----------|-------------|------------|-----------|----------|
| | Euro code | 0mm | | Euro code | 0mm |
| 2200 | 13 | 11.6 | 1100 | 0 | -0.1 |
| 2100 | 5.5 | 4.6 | 1000 | 0 | -0.1 |
| 2080 | 4 | 3.2 | 900 | 0 | -0.1 |
| 2000 | 3.3 | 2.5 | 800 | 0 | -0.1 |
| 1900 | 2.5 | 1.7 | 700 | 0 | -0.1 |
| 1800 | 1.7 | 0.9 | 600 | 0 | -0.1 |
| 1700 | 0.8 | 0.3 | 500 | 0 | -0.1 |
| 1600 | 0 | -0.2 | 400 | 0 | -0.1 |
| 1500 | 0 | -0.2 | 300 | 0 | 0 |
| 1400 | 0 | -0.2 | 200 | 0 | 0 |
| 1300 | 0 | -0.2 | 100 | 0 | 0 |
| 1200 | 0 | -0.2 | 0 | 0 | 0 |

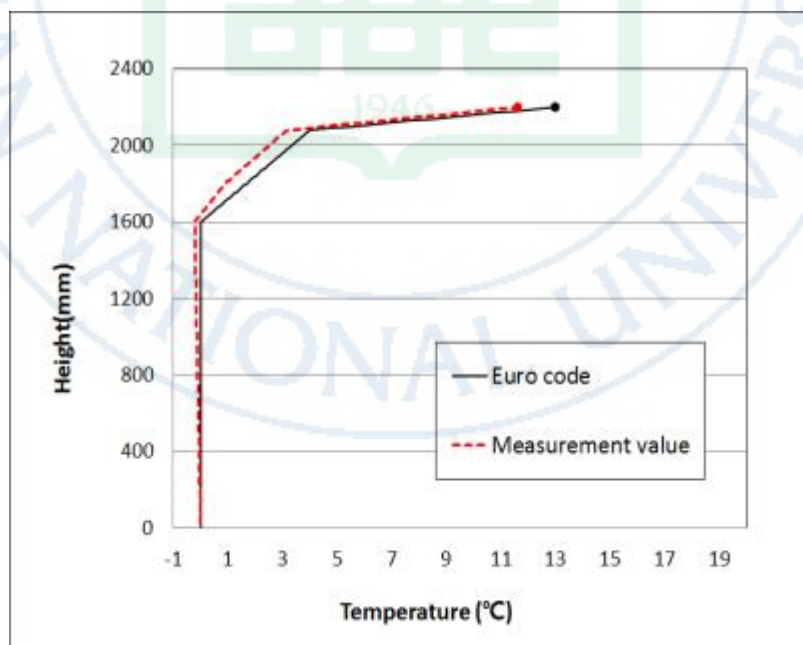


그림 48 2016년 100mm 온도차 그래프

4) 2017년 피복 0mm 시험체

표 31 2017년 0mm 온도차 결과

| Height(mm) | 온도경사(TG) | | Height(mm) | 온도경사(TG) | |
|------------|-------------|-------------|------------|-----------|-----|
| | Euro code | 0mm | | Euro code | 0mm |
| 2200 | 16.5 | 15.9 | 1100 | 0 | 0.1 |
| 2100 | 6.1 | 6.4 | 1000 | 0 | 0.1 |
| 2080 | 4 | 4.5 | 900 | 0 | 0.1 |
| 2000 | 3.3 | 3.9 | 800 | 0 | 0.1 |
| 1900 | 2.5 | 3.0 | 700 | 0 | 0.1 |
| 1800 | 1.7 | 2.2 | 600 | 0 | 0.1 |
| 1700 | 0.8 | 1.3 | 500 | 0 | 0.1 |
| 1600 | 0 | 0.5 | 400 | 0 | 0 |
| 1500 | 0 | 0.3 | 300 | 0 | 0 |
| 1400 | 0 | 0.2 | 200 | 0 | 0 |
| 1300 | 0 | 0.1 | 100 | 0 | 0 |
| 1200 | 0 | 0.1 | 0 | 0 | 0 |

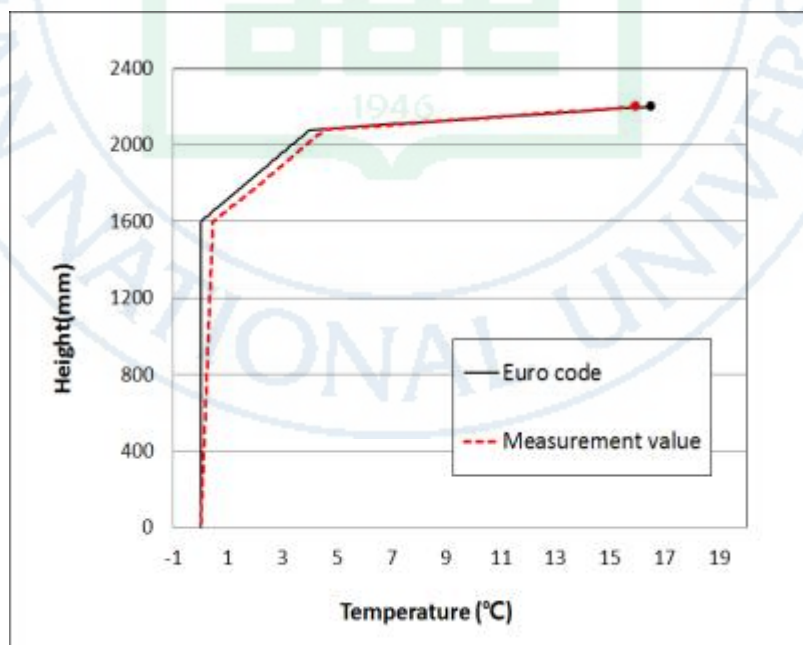


그림 49 2017년 0mm 온도차 그래프

5) 2017년 피복 150mm 시험체

표 32 150mm 온도차 결과

| Height(mm) | 온도경사(TG) | | Height(mm) | 온도경사(TG) | |
|------------|-------------|-------------|------------|-----------|----------|
| | Euro code | 0mm | | Euro code | 0mm |
| 2200 | 10.5 | 10.9 | 1100 | 0 | 0.3 |
| 2100 | 5.1 | 5.4 | 1000 | 0 | 0.3 |
| 2080 | 4 | 4.3 | 900 | 0 | 0.2 |
| 2000 | 3.3 | 3.7 | 800 | 0 | 0.2 |
| 1900 | 2.5 | 2.8 | 700 | 0 | 0.2 |
| 1800 | 1.7 | 2.0 | 600 | 0 | 0.2 |
| 1700 | 0.8 | 1.2 | 500 | 0 | 0.1 |
| 1600 | 0 | 0.4 | 400 | 0 | 0.1 |
| 1500 | 0 | 0.4 | 300 | 0 | 0.1 |
| 1400 | 0 | 0.4 | 200 | 0 | 0.1 |
| 1300 | 0 | 0.3 | 100 | 0 | 0 |
| 1200 | 0 | 0.3 | 0 | 0 | 0 |

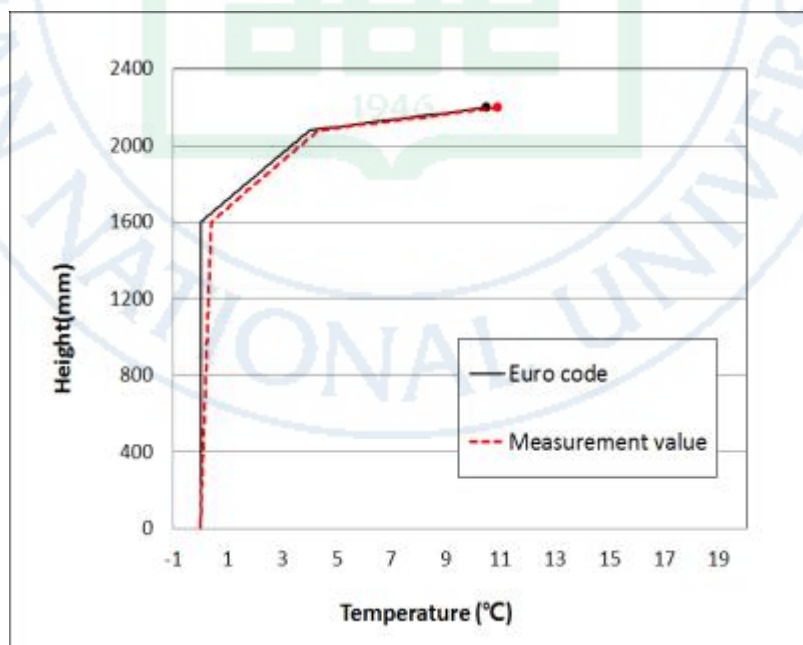


그림 50 2017년 150mm 온도차 그래프

6) 온도차 결과 종합

5개 시험체의 온도차 결과를 종합하면 표 33과 같다. 0mm, 50mm, 100mm 시험체에서는 Euro code와 비교하여 음의 차이를 보였으나, 피복 150mm 시험체에서는 양의 온도 차이를 보였다. 오차율은 약 3.4% ~ 10.7%로 Euro code와 유사한 온도 차이를 보인다.

표 33 피복두께별 온도차 결과 정리

| ℃ | 0mm | 50mm | 100mm | 150mm |
|-----------|------|------|-------|-------|
| Euro code | 16.6 | 18 | 13 | 10.5 |
| 실측치 | 15.8 | 16.6 | 11.6 | 10.9 |
| 차이 | -0.8 | -1.4 | -1.4 | +0.4 |
| 오차율 | 3.4% | 7.8% | 10.7% | 3.8% |

V. 결론

상부 피복 0mm, 50mm, 100mm, 150mm의 강박스거더 모형을 제작하고 2년간 온도를 측정하여 다음과 같은 피복두께에 대한 유효온도와 온도차 기준의 기초자료를 확보하였다.

(1) 피복 두께에 따른 최고 유효온도의 온도 조정치는 아래와 같이 도출되었다.

| ℃ | 0mm | 50mm | 100mm | 150mm |
|-----------|-----|------|-------|-------|
| Euro code | 0 | +2 | 0 | -2 |
| 실측치 | 0 | +2.3 | +0.4 | -0.7 |

전체적으로 Euro code와 비교하여 약간 높은 유효온도를 보였으나 편차는 신뢰성이 있는 것으로 판단된다.

(2) 피복 두께에 따른 온도차 기준은 다음과 같이 도출되었다.

| ℃ | 0mm | 50mm | 100mm | 150mm |
|-----------|------|------|-------|-------|
| Euro code | 16.6 | 18 | 13 | 10.5 |
| 실측치 | 15.8 | 16.6 | 11.6 | 10.9 |
| 차이 | -0.8 | -1.4 | -1.4 | +0.4 |
| 오차율 | 3.4% | 7.8% | 10.7% | 3.8% |

온도차는 Euro code와 비교하여 3.4 ~ 10.7% 정도의 편차를 보이며, 비교적 유사한 온도차를 보인다.

향후 신뢰성 있는 결과와 선진선계법의 국내적용을 검토하기 위해서는 다년간의 온도측정이 필요할 것으로 요망된다.

참고문헌

- [1] British Standards Institution (2004), Steel, Concrete and Composite Bridges, Part 2. Specification for loads, BS5400:Part2:1978, pp.20-23.
- [2] AASHTO (2002) Standard Specifications for Highway Bridges, 17th Ed., HB-17. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.
- [3] AASHTO (2007) AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (SI Units, 4th Edition), pp.3-99 ~ 3-104.
- [4] 국토교통부(2016) 도로교설계기준(한계상태설계법)
- [5] 이성행(2014) 계측에 의한 콘크리트 슬래브가 없는 강박스거더의 상하 온도차 연구, Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol.15, No.12, pp.
- [6] 이성행, 신호경, 김경남, 정경섭(2016) 강박스거더교의 설계 유효온도 산정을 위한 실험적 연구, Journal of Korean Society of Steel Construction, Vol.28, No6, pp.449-458.
- [7] 신동욱, 김경남, 최철호, 이성행(2013) 강상자형교의 강바닥판에서 설계온도하중을 위한 유효온도 산정, Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, Vol.17, No.6, pp.077-087.
- [8] 이성행(2016) 강상자형교의 설계온도하중을 위한 최고 유효온도 산정, Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol.17, No.8, pp.133-139.

[9] 박태균(2012) 강박스거더교 다이아프램부의 온도 및 응력 분배 거동

[10] Roeder, C. W. (2002), *Thermal Design Procedure for Steel and Concrete Bridges*. Final Report for NCHRP 20-07/106. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC.



A Study on Temperature Design Standard in Steel Box Girder Bridge Considering Surface Thickness of Concrete Deck

Shin, Hyo-Kyoung

Department of Civil Engineering
The Graduate School
Pusan National University

Abstract

In this study, temperature design standard according to surface thickness of concrete deck in steel box girder bridge was studied. The existing Korean highway bridge design code does not include temperature standards for design according to surface thickness. But Euro code has a detailed temperature standard. 4 Steel box girder model specimen with surface depth of 0 mm, 50 mm, 100 mm, 150 mm respectively was made. In each model, 17 ~ 23 temperature sensors were attached to the concrete part and the steel part. Temperature was measured for 2 years and the effective temperature and top to bottom temperature difference were calculated on the basis of the measured data. As a result of the analysis, effective temperature according to surface thickness were calculated as being very similar with the Euro code, the deviation was judged to be a reliable. Also, the temperature difference was showed 3.4 ~ 10.7% variations to the Euro code. Thus, temperature design standard that was studied in this thesis can be used very usefully as the basis data in calculating the design temperature load.

Keywords : Effective temperature, Temperature difference, Surface thickness of concrete deck, Temperature design standard, Steel box girder specimen

감사의 글

대학원진학을 결정하고 대학원 생활에 도움을 주신 모든 분께 감사의 말씀을 드립니다. 주위의 감사한 많은 분 덕분에 대학원 졸업과 함께 건설인으로서의 역량을 향상할 수 있었습니다.

2016년 학부 연구생으로 교량구조연구실에 들어왔을 때부터 2018년 졸업을 앞둔 지금까지 가까이에서 저를 지켜보고, 조언해주시고, 질책해주시고, 또 잘한 일은 크게 칭찬해주신 이성행 교수님께 진심으로 감사드립니다. 교량구조연구실에서 배우고 익혀온 것을 바탕으로 사회에서 교수님께 자랑스러운 제자가 되고 싶습니다.

그리고 항상 옆에서 무조건적인 응원해주고 팬찮다고 다독여준 사랑하는 나의 가족, 함께 연구실을 쓰며 좋은 동료가 되었던 이장훈, 대학에 다니며 서로에게 자극제이자 대학 생활의 큰 즐거움이 되었던 우리 박씨원룸메이트 류다영이, 박채빈이, 박아현이에게도 고마움과 감사를 전합니다. 대학원에 진학하여 만난 이제는 없어서는 안 될 소라 언니, 중학교 때부터 알고 지낸 나의 가장 행복했던 모습과 가장 슬펐던 모습 전부 옆에서 지켜본 사랑하는 키친 허현정에게도 고마움을 전합니다.

본 논문을 바탕으로 우리나라 교량의 온도 설계하중에 대한 연구가 활발해지고, 선진설계법으로의 도약에 도움이 됐으면 하는 바람입니다. 감사합니다.

2017년 12월

신 효 경