

아스팔트 콘크리트의 고온 내변형성 평가기법 개발

2008. 12. 29.

주관연구기관 / 강원대학교

건 설 교 통 부
한국건설교통기술평가원

제 출 문

건설교통부장관(한국건설교통기술평가원장) 귀하

본 보고서를 “아스팔트 콘크리트의 고온 내변형성 평가기법 개발”의 최종보고서로 제출합니다.

2008 . 12. 29.

주관연구기관 : 강원대학교

산업현력단장 : 이 명 구

■ 총괄연구책임자 / 수석연구원 김광우 변형강도와의 상관성 분석 총괄

■ 주관연구기관 참여연구원 / 책임연구원 도영수 현장공용성과 상관성분석
/ 선임연구원 안경애 특수 혼합물 변형강도 상관성 분석
/ 연구원 백성현 모의주행시험기 분석 실험
/ 연구원 박남원 OGFC 변형강도 상관성 분석
/ 연구원 김현환 SMA 혼합물 실험
/ 연구원 김진철 배수성 혼합물 실험
/ 연구원 라일호 현장조사연구
/ 연구원 박지용 현장조사

■ 국제공동연구책임자 / Professor Amirkhanian 변형강도와 APA 상관성 분석 총괄

요 약 문

I. 제목

아스팔트 콘크리트의 고온 내변형성 평가기법 개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

연구 개발의 최종 목표는 아스팔트 혼합물의 변형강도 (Deformation strength: S_D) 측정법을 개발·정립하고 이 시험법의 타당성을 타 시험법 및 현장 공용성과의 상관성 평가를 통하여 표준화된 소성변형 추정방법으로 제시하는 것이다. 당해 연도의 연구 목표는 특수 아스팔트 포장 혼합물(Stone Mastic Asphalt: SMA, 배수성, 개립도 마찰층(Open-graded friction course: OGFC)의 공용성과 변형강도의 상관성 분석 및 변형강도 시험법적용 기준을 정립하는 것이다.

기존 아스팔트 혼합물의 소성변형 저항성 평가방법으로는 반복주행 (Wheel tracking: WT)시험, 아스팔트 포장분석기(Asphalt pavement analyzer: APA)시험, 회복탄성계수 (Resilient modulus: M_R) 시험, 동적크리프 (Dynamic load creep) 시험, 삼축 동적압축 (Triaxial dynamic compression) 시험 등이 있다. 하지만 이들은 모두 동적 재하시험이고 장비가 고가이며, 시험방법이 비교적 어렵고 미숙련자의 경우 작은 환경변화에도 결과의 변동성이 크게 나타나게 되며 해석도 어려워 실용성이 떨어진다. 이 중에서 가장 널리 사용되는 것이 반복주행시험으로 왕복 윤하중에 의해 슬래브 공시체에 발생하는 침하정도 및 동적안정도를 측정한다. 이는 상대적으로 이해가 쉽고 비교적 공용성과 상관성이 높아 많이 사용되기는 하나 여전히 슬래브 공시체 제조용 다짐기와 반복주행 시험기의 구비는 부담스럽고 공시체 제조부터 시험까지 시간도 어느 정도 걸리는 번거로운 시험이다. 게다가 시험 결과가 배합설계 등에도 반영되지 못하므로 단순히 재료의 상대 비교용으로 이용되고 있어 보다 간편하고 실용성 있는 시험법의 개발이

요구되고 있는 실정이다.

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

1차년도 연구에서는 변형강도의 시험 변수 정립 및 2-3차년도 연구의 기반을 확보하는 것이었다.

반복성 검증을 위해 동일 혼합물로 수 주 일 내 1, 2차 시험 후 2 개월 지나 다시 같은 재료로 같은 시험(3차)을 수행하고 반복성을 평가하였다. 시험항목은 WT, 간접인장강도 (indirect tensile strength : ITS), 마찰 안정도, 변형강도 (S_D) 시험이며, 3가지 다짐기를 사용했다. 이는 전압다짐기 (Roller press compactor), 선회 다짐기 (Superpave gyratory compactor: SGC), 마찰 다짐기(Marshall compactor)이며 이중 전압다짐기는 슬래브공시체 제조에만 사용되었다.

공극 (밀도) 변화와 변형강도의 상관성 분석을 위해 아스팔트 함량에 따른 공극변화를 주기위해 AP함량을 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0, 6.5까지 6단계로 변화시켜 가며 선회다짐으로 혼합물을 제조하여 S_D 시험을 통해 최적아스팔트 함량(OAC)을 구했으며, 이 OAC에서 선회다짐을 15, 30, 45, 60, 75, 90회로 변화시켜가며 공극이 다른 혼합물을 제조하여 S_D 시험을 통해 공극과 S_D 의 상관성을 분석하였다. 또한 APA 시험과의 상관성 분석을 위해 직경 150mm 공시체로 혼합물을 제조하여 시험을 수행하였다.

본 연구에서는 혼합물이 노화된 후 어떠한 소성변형 저항성을 가지는지를 파악하기 위한 실험을 수행하였다. 노화된 혼합물로 WT와 S_D 를 측정하고 상관성을 구하고 공시체의 노화정도를 판정하기 위하여 Gel-permeation chromatography (GPC) 측정을 통하여 바인더의 노화에 따라 증가하는 대형분자(Large molecular size: LMS)의 비율 변화 상태를 분석하였다.

최적 재하 속도의 선정을 위한 수직 정하중 속도변수를 5, 20, 35, 50, 70mm/min까지 5단계로 변화시켜 가며 제어 시험을 수행하였다. 이 결과를

같은 혼합물의 WT 시험결과와 회귀분석을 통하여 최적 재하속도를 찾고자 하였다.

2차년도 전반기에는 시험조건 정립을 위한 연구에 중점을 두고 연구를 수행 하였으며 후반기에는 현장 공용성과의 상관성 분석을 위해 현장 및 모의주행 시험 피트에 포설, 코어 채취 등에 중점을 두고 연구를 진행하였다.

변형강도 시험조건 정립을 위한 연구는 공시체 가열 방법 및 가열 시간의 선정, 하중봉의 원형절삭 반경에 따른 골재치수별 영향분석, 최적 재하속도 선정을 위해 반복주행 시험특성과 변형강도의 상관분석을 하였다. 현장 공용성과의 상관분석을 위해서는 현장 시험포장 지역 및 시험포장이 아닌 지역 중에서 포장의 이력을 확인할 수 있는 지역을 선정하였다. 정상지역과 소성변형 발생지역에서 노면상태를 조사하고 각각 코어를 채취한 후 그 코어로부터 S_D 를 측정하여 소성변형과의 상관성을 분석하였다. 또한 현장 모의 원형 주행 장치(Field-simulated circular wheel tracker: FCWT)를 개발하여 피트(test pit)에 설치하고 다양한 혼합물을 포설하여 반복주행시험 및 시험 피트 포장 및 모의주행에 의한 공용성과 S_D 의 상관성 분석하였다. 그리고 회복탄성계수(M_R) 및 동적크리프 시험 결과와 변형강도(S_D)의 상관성 분석을 수행하였다.

3차 년도는 밀입도 혼합물이 아닌 특수한 혼합물에 대하여 변형강도 적용가능성을 확인하기 위한 연구와 시험방법의 표준화 연구를 수행하였다. 또한 S_D 를 이용한 박리저항성 측정 가능여부를 확인하기 위하여 잔류변형강도 비를 통한 활용성 분석, SMA 혼합물의 변형강도 분석, 배수성 혼합물의 변형강도 분석, 미국의 OGFC 혼합물의 변형강도 분석을 수행하였다.

또한 시험 피트에 혼합물을 포설하고 공용성과의 상관성 분석을 위하여 현장모의 원형주행시험에 의한 자료를 수집하고 변형강도와 상관성 분석을 지속적으로 수행하였으며, 국내 뿐 아니라 국외의 실제 소성변형 발생지역 도로에서 코어를 채취하여 변형강도를 통한 현장 공용성과의 상관성 분석도 지속하여 수행하였다. 끝으로 당해 연도의 시험포장 포설은 춘천인근이 아

년 여름철 고온현상이 심한 대구에 입접한 경북 구미 지역에 현장 공용 후에 상관성을 분석하기 위한 시험포장을 포설하였다.

IV. 연구개발 결과

본 연구 과제의 최종목표는 아스팔트 혼합물의 변형강도 측정법을 개발하고 이 시험법의 타당성을 현장 공용성과의 상관성 평가를 통하여 표준화된 소성변형 추정방법을 제시하는 것이다. 3차 년도까지의 중요 연구내용을 종합하여 정리하면 다음과 같다.

1. 변형강도는 밀입도 아스팔트 혼합물의 공극률 변화와 높은 관계가 있다. 공극률이 높으면 변형강도가 낮으나 공극률이 낮아지며 변형강도가 높아지고 4%보다 약간 낮은 점에서 최대의 변형강도를 이루었다. 그리고 그 이하로 공극률이 낮아지면 변형강도도 낮아지는 것을 알 수 있었다. 따라서 기존의 배합설계 기준인 공극률 4%에서의 최적 아스팔트 함량선정과 병행하여 거의 최대의 변형강도가 얻어지므로 배합설계의 하나의 변수로 원활히 적용할 수 있음을 알 수 있었다.
2. 대형분자와의 상관성 분석에서, 노화 시간의 증가에 따라 대형분자 (Large molecular size: LMS)의 증가가 뚜렷하게 나타났으며, S_D 는 그 LMS 변화에 양호한 상관관계를 가짐을 알 수 있었다. 즉, 노화된 아스팔트 혼합물은 바인더 강성이 증가하는데 이로 인하여 소성변형 저항성이 높아지며 변형강도도 높게 나타남을 확인 하였다. 이는 혼합물의 종류 뿐만 아니라 혼합물의 상태변화도 변형강도 측정을 통해서도 확인을 할 수 있음을 발견한 것이며, 변형강도와 혼합물의 소성변형 특성과 상관성이 밀접함을 재차 확인한 것이라 할 수 있다.
3. 현장모의 원형주행 장치 (Field-simulated circular wheel tracker:

FCWT)에 의한 침하깊이는 각 혼합물의 소성변형저항 특성을 잘 대변하는 것으로 나타났다. 즉, 포설당시 각 혼합물로 제조한 공시체의 변형강도는 FCWT에 의한 최종침하깊이(Rut depth: RD) 및 동적안정도(Dynamic stability: DS)와 매우 높은 상관관계를 보였다. 반면에 코어 채취한 공시체에서 측정한 S_D 는 실험실 제조 공시체로 측정한 S_D 보다 전체적으로 크게 낮았으나 FWCT 결과와의 결정계수(R^2)가 0.72 이상으로 상관관계가 양호한 것으로 나타났다. 또한 배수성 혼합물의 경우는 밀입도 혼합물 코어 공시체의 S_D 가 낮아지는 정도보다 심한데, 코어채취시의 수압이 다공성 혼합물의 경우 혼합물에 더 큰 손상을 주기 때문인 것으로 보인다.

4. 변형강도와 현장 공용성과의 상관성 분석을 위하여 현장 침하깊이(Rut depth: RD)와 같은 위치에서 채취한 코어 공시체의 S_D 를 각각 y와 x로 놓고 회귀분석을 수행한 결과 $R^2 = 0.7$ 이상인 것으로 나타났다. 즉, 양 궤적(wheel path)의 소성변형 깊이와 같은 선상의 중앙부(Mid lane)에서 채취한 표층 코어의 S_D 를 보면 소성변형이 심한 곳의 S_D 가 소성변형이 적은 곳의 S_D 보다 낮은 경향을 확인할 수 있었으며 3년간 전체 data의 R^2 이 0.71 이상이어서 양호한 상관관계가 있음을 알 수 있었다.

또한 현장 소성변형 특성분석을 위해 시험포장을 수행하였으며 소성변형이 발생하는 다음 연도부터 소성변형 측정과 코어채취를 통해 변형강도와의 상관성 분석을 수행하였다. 코어의 변형강도와 현장에서 측정된 소성변형 깊이와의 상관성을 분석한 결과 2년간의 R^2 이 역시 0.7 정도로 양호하게 나타났다.

5. 변형강도와 아스팔트포장분석기 (Asphalt pavement analyzer: APA)

시험의 침하깊이와의 상관성은 $R^2 > 0.78$ 로 좋게 나타났다. APA 시험기는 미국 Georgia, South Carolina 주 등 여러 주에서 아스팔트 혼합물의 소성변형을 판정하는 시험기로 사용하며 혼합물이 일정치 이상 침하깊이를 보이면 불합격처리하고 재 배합설계를 요구하는 기준으로 사용하기도 한다. 따라서 이 APA 시험결과와 S_D 의 상관관계가 좋다는 것은 그만큼 S_D 가 소성변형 저항성의 측정치로서 신뢰성이 있음을 의미한다고 하겠다.

6. 장기노화의 시간이 길어질수록 대형분자량의 증가와 변형강도가 증가한 것을 알 수 있다. 노화의 시간의 증가에 따라 대형분자 (LMS)의 증가가 뚜렷하게 나타났다. 특히 노화상태의 진전은 초기 24시간 사이에 크게 증가되었고 그 이후로는 증가 추세가 완만하게 나타나 인공노화 초기에 주로 급속한 노화가 나타남을 알 수 있었다. 특히, 본 연구를 통해 아스팔트 혼합물을 실험실에서 단기와 장기 인공노화 시키는 방법을 정립하는 계기가 되었다. 향후 이를 좀 더 연구하면 국내 실험연구의 체계적인 실험방법으로 표준화가 가능할 것으로 보인다.
7. 반복성 시험 분석결과, 변형강도의 1, 2단계 시험간의 상관성은 여타 시험방법들보다 월등히 높게 나타났다. 두 결과의 상관관계는 높게는 $R^2 = 0.95$ 이상부터 적어도 $R^2 = 0.78$ 이상이어서 두 제조방법 모두에서 비교적 좋은 상관성을 보였다. Wheel tracking의 R^2 도 S_D 와 유사하거나 다소 높았지만 안정도나 간접인장강도는 R^2 이 훨씬 낮았다.
8. 건조오븐에 공시체를 넣고 60°C 로 가열하는 방법은 공시체 내부가 시험온도인 60°C 가 되는데 2시간이 걸려 30분 만에 가열되는 수침방법에 비해 4배 오래 걸렸다. 건조가열로 측정된 S_D 는 수침가열에 비해 다소 높게 나타나지만 변동계수는 더 커서 변동성이 높으므로 시간이

적게 걸리고 변동성이 낮은 수침가열을 표준 방법으로 결정하였다.

9. 공시체 직경 100mm의 S_D 평균은 150mm 공시체의 평균보다 적게 나타나 공시체 직경에 따른 차이가 통계적으로 유의차가 있는 것을 알 수 있었다. 이제까지의 data에 의하면 약 10% 정도의 차이가 나므로 이를 반영하여 배합강도 기준치에 적용토록 하였다.

10. 하중봉의 직경을 40mm로 사전연구에서 결정한 상태에서 적정 원형절삭 반경(r) 선정을 위해 다양한 r 에 대해 변동성 및 민감도 분석을 수행하였다. 그 결과 굵은골재 최대치수 10, 13, 19mm 아스팔트 혼합물에서 $r=10\text{mm}$ 가 가장변동성이 적은 것으로 나타났다. 침하깊이(y) 변화에 따른 민감도 분석에서 r 이 너무 크면 낮은 y 에서 변동성이 매우커지며 반면에 r 이 너무 작으면 변동성은 줄어드나 민감도가 떨어져 변별력이 낮아지는 것으로 나타났다. 하지만 $r=10\text{mm}$ 은 상기 크기 골재 혼합물에서 실용적 침하깊이 $y=3\sim6\text{mm}$ 수준(실제 변형강도 측정시 대부분 공시체의 침하깊이가 3~6mm 정도임)에서 가장 안정적이고 변동성도 낮으며 비교적 변별력이 큰 시험결과를 얻는 것으로 나타났다. 따라서 하중봉 치수는 $D=40\text{mm}$, $r=10\text{mm}$ 로 결정하였다.

11. 재하속도 연구에서 변형강도 값은 재하속도가 증가함에 따라 같이 증가하는 경향을 보였다. 따라서 재하속도가 느릴수록 응력이완 현상 및 더 큰 수평 전단유발에 의해 변형강도가 낮게 측정되는 것으로 추정된다. 재하속도별로 얻어진 S_D 값과 WT 시험결과와의 상관성 분석을 통해 30mm/min의 속도가 가장 적합한 것으로 선정되었다.

12. 변형강도가 큰 것은 같은 온도인 60°C 동적크리프(Dynamic-load creep: DC)가 작아 혼합물의 변형 진행이 느린 것으로 나타났다. 이

로부터 변형강도가 높으면 동하중하에서 혼합물의 변형이 늦게 진전되므로 소성변형에 강할 것임을 변형강도와의 상관성분석을 통해서 알 수 있었다.

회복탄성계수(M_R)의 측정이 가능한 비교적 고온인 40°C 에서의 M_R 은 S_D 와 비교적 높은 상관관계를 보였다. 하지만 상온(25°C)에서의 M_R 은 상온상태 특성이므로 고온특성인 S_D 와 상관성이 40°C M_R 보다는 낮은 것으로 나타났다. 이를 통해 S_D 시험치는 Dynamic 재하 시험인 DC나 M_R 시험 치와도 고온상태에서 양호한 상관관계를 보이는 것을 확인할 수 있었다.

13. 잔류변형강도 비 결정을 위한 24, 48시간 수침시간을 비교한 결과 48시간 수침 처리 후의 변형강도가 수침 전과 비교하여 확연한 차이를 보임으로써 48시간 수침이 더 적절하다는 것을 알 수 있었다. 이 결과와 WT 시험결과를 가지고 아스팔트 혼합물의 수분취약성을 판정하는 기준을 S_D 로 정립하려 시도하였으나 WT 시험결과가 수침에 따른 취약성을 제대로 반영하지 못하여 S_D 와의 상관관계를 구할 수 없었다. 즉, 아스팔트 혼합물을 수침 후 WT 시험을 수행하면 수침 후의 침하깊이가 수침 전 보다 더 낮게 나오는 현상으로 인해 수침 처리에 따른 취약성 분석이 현 WT 시험 장치로는 불가능함을 확인하였다. 따라서 WT의 윤하중 압력을 증가 시키는 등 추후 심도 있는 연구를 통하여 이를 재검토해야 할 것이다.

14. 종합적으로 밀입도 아스팔트 혼합물의 변형강도는 고온(60°C)에서 수행되는 반복주행시험(WT), APA 시험, 동적크리프시험은 물론 40°C 에서 수행된 M_R 과도 모두 R^2 이 0.7 이상으로 양호한 상관관계를 가지는 것을 확인할 수 있었다. 게다가 현장 소성변형 특성과의 상관관계가 좋아 변동성이 큰 건설재료의 특성을 고려한다면 변형강도는

매우 우수한 아스팔트 혼합물의 소성변형 저항성 측정치라 할 수 있다.

15. SMA 혼합물 소성변형 저항성 평가를 위해 변형강도 시험을 적용한 결과 변형강도 값이 유사한 WT 결과를 보이는 밀입도 혼합물의 S_D 에 비하여 낮게 나왔다. 또한 SMA가 실제 도로에서 우수한 점을 고려한다면 WT 시험을 수행한 결과도 밀입도 보다 그리 좋지 못해 S_D 는 물론 WT 시험도 SMA의 소성변형 저항성을 평가하는데 문제가 있음을 확인하였다. 결과적으로 시험결과 치가 낮은 것에 문제도 있지만 두 값의 상관성도 전반적으로 낮아 SMA 혼합물에는 일반 밀입도 혼합물에 쓰이는 공학적 시험법들의 적용에 한계가 있음을 확인하였다.

16. 배수성 혼합물의 변형강도 적용에서는 국내 배수성과 미국의 OGFC (Open-graded friction course) 모두 SMA 혼합물과 같이 변형강도 값이 밀입도에 비하여 전반적으로 낮게 나왔다. 그 중에서도 미국 OGFC보다 국내 배수성에서 더 낮았는데 이는 OGFC의 골재입형이 더 양호하기 때문인 것으로 추정된다. 또한 WT 시험과의 상관성 분석결과 전반적으로 낮아 SMA과 마찬가지로 배수성 혼합물 등 특수 혼합물에는 일반 밀입도 혼합물에 쓰이는 시험법들의 적용에 한계가 있음을 확인하였다.

17. 현장 원형모의주행시험기의 최종침하깊이와 포설 당시 변형강도와의 상관성은 밀입도 혼합물에서 R^2 값이 0.7 이상으로 양호한 상관성을 보였다. 하지만 배수성 혼합물의 경우 현저하게 낮은 변형강도와 상관성을 보여 배수성 혼합물 배합설계에 변형강도를 적용하려면 더 많은 연구가 필요함을 확인하였다.

18. 아스팔트 혼합물(직경 100mm 공시체)의 평균 변동계수(Coefficient of variation: V_c)는 8.4(%) 이었다. 따라서 $V_c = 8.4\%$ 로 하면 표준편차 $s = 0.084 \times \text{평균}$ 이고, 검사특성곡선 개념을 이용하여 소비자 위험률 10%(0.1)를 임계치에서 번어날 확률에 해당하는 값으로 정하고 정규 분포 표에서 $z_{0.1} = -1.28$ 과 공시체수 $n=3$ 을 이용하여 밀입도 아스팔트 혼합물의 배합강도 최소치를 산정하면 일반도로포장용 혼합물 3.2 MPa과 간선도로포장용 혼합물 4.25 MPa가 설정되었다.
19. 상기의 배합강도는 재하속도 30mm/min를 기준으로 한 값이다. 만일 국내에 많이 보급된 마샬 안정도 시험기의 기본 속도인 50mm/min로 변형강도를 측정하면 이보다 더 높은 값이 얻어진다. 통계적 분석에 의하면 그 증가율은 일반도로포장용 혼합물은 10%, 간선도로포장용 혼합물은 6%이며 이를 공시체 직경 100mm 혼합물에 적용하면 일반 도로와 간선도로는 각각 3.5MPa, 4.5MPa의 배합강도가 기준치가 된다.
20. 모든 혼합물은 항상 같은 품질로 생산이 되지 않으므로 편차가 발생하고 이 편차의 정도가 변동계수(V_c)로 나타나며 제조되는 혼합물의 배합강도 (공정 평균: m)도 V_c 에 따라 차이가 나게 된다. 즉, m 을 구하는 식은 V_c 와 n 으로 이루어진 함수로서 같은 공시체 수(n)에서는 V_c 가 증가하면 m 이 증가하고, 같은 V_c 에서는 n 이 증가함에 따라 m 이 감소함을 알 수 있었다. 따라서 상기의 배합강도 최소치는 공시체 3개와 변동계수가 8.4% 정도 얻어지는 밀입도 혼합물에 근거해 정해진 것이며 변동계수가 더 커지면 배합강도는 더 커져야 한다.

V. 연구개발결과의 활용계획

본 연구를 통해 그간 실내 실험 결과만을 가지고 실용가능성이 클 것으로 확인된 변형강도(S_D)를 현장 공용성의 확인을 통해서도 확인 하였다. 또한 각종 치수 및 시험방법을 표준화하여 정립하고 기존의 시험법과의 상관성 분석을 통해 S_D 가 소성변형 저항성평가에 그 시험법들과 유사한 결과를 보임을 확인하였다. 따라서 이를 실용화 하여 배합설계에 적용 한다면 본 시험법의 개발은 성공 가능성이 매우 높고 국내는 물론 외국에서도 활용성이 매우 클 것이다. 이에 한국형 아스팔트포장 설계법에서는 S_D 를 아스팔트 혼합물 배합설계의 주요 변수로 채택하도록 추진하고 있다. 왜냐하면 마샬 배합설계에는 물리적 성질에 해당하는 공극과 채움율(포화도) 외에 공학적 특성 중 하중관련 변수로 안정도와 변형관련 변수로 흐름이 있다. 하지만 이 두 가지가 다 무용론이 제기되고 있어 이의 대체특성이 필요하며 배합설계의 개선도 필요한 실정이었다. S_D 는 하중관련변수 “P”와 변형관련 변수 “y”의 함수이므로 안정도와 흐름을 제외하고 이것이 포함된다면 이는 제외되는 두 특성을 모두 반영하는 것이 된다.

따라서 한국형 배합설계법에서는 밀입도 13, 19mm 아스팔트 혼합물의 S_D 기준치를 전시한대로 일반도로 3.2MPa과 간선도로 4.25MPa로 규정하여 국토해양부 잠정 지침에 명시한 상태이다. 이 S_D 값의 기준은 현장공용성에 근거해서 설정되었으므로 이를 향후 공식적인 지침에 적용하면 현실적인 수치를 배합설계 혼합물에 적용하는 계기가 될 것이다.

그렇게 되면 S_D 의 사용이 아스팔트 혼합물 제조에 필수사항이 되며 그로 인해 아스팔트 혼합물의 소성변형저항성을 변형강도 시험을 통해 일정치 이상 가지도록 함으로써 국내 아스팔트 혼합물의 품질을 향상시키는 계기가 될 것이다. 즉, S_D 는 시험법이 간편하고 기구도 간단하여 활용성이 크며 이의 적용은 국내에서 개발된 시험법을 국내에 적용하여 국내 아스팔트 혼합물 제품을 업그레이드 시키는 대표적인 사례가 될 것이다. 또한 향후 지속적인 모니터링을 통해 필요시 보완책을 강구해 나아갈 것이다.

여 백

SUMMARY

I . Research Title

Development of a test method for estimating high-temperature deformation resistance of asphalt concretes.

II . Research Objectives and Necessities

The final objective of this study is to develop a test method for measuring resistance against deformation of asphalt concrete and to suggest the method as a standard procedure for estimating permanent deformation of asphalt mixture. The objective of 1st year study is to establish basic procedures of the test method based on correlation analysis with actual field performance and the performance under the simulated field circular wheel tracker (FCWT), providing basis for 2nd and 3rd year study.

Rutting is one of the most pronounced distresses in asphalt pavements, but the potential of it is not easy to predict by a simple test on asphalt mixture to be paved. Therefore, in general, the rutting potential of hot-mix asphalt (HMA) mixture is evaluated through repeated or cyclic loading tests, such as asphalt pavement analyzer (APA), wheel tracking (WT), dynamic-load creep (DLC), resilient modulus (MR), three-dimensional test [ASTM D3497] and in a larger scale, accelerated loading facility (ALF). Though these are well-established analyzing techniques for rutting estimation of asphalt mixture, equipments for these tests are relatively expensive and some procedures are rather complicated to follow in many cases.

There are several static tests for measuring property of asphalt concrete, including Marshall stability (MS), Hveem stabilometer value (ASTMD1560),

indirect tensile strength, compressive strength (ASTMD1074), immersion compressive strength (ASTMD1075), etc. Most of these test procedures are relatively simple, but have been known to show a little correlation with rut characteristics of asphalt concretes.

Several studies were made on this issue to recommend the simple performance test (SPT) for permanent deformation evaluation of asphalt mixtures. As an example, Witzak recommended three candidates as SPT; dynamic modulus, static creep and repeated load permanent deformation tests. Some studies were found to evaluate asphalt mixtures by using punch test concept. Jimenz investigated asphalt mixtures for measuring double punch tension and durability of asphalt materials. A uni-axial penetration test was investigated for its suitability to characterize shear resistance of HMA. They use static and cyclic loading through a steel rod (without round edge) with a diameter of 28.5 mm to find out the relationship with tri-axial compression test results for estimation of shear resistance of HMA. The static creep test technique was also used for rut potential estimation of HMA. But those recommended procedures for rut estimation purpose in laboratory are not widely used. Therefore, a simple strength test method needs to be developed for estimating rutting potential of asphalt mixtures.

This research was established to achieve this goal by adopting the strength against deformation, or deformation strength designated as S_D , which has been found to have a relatively high correlation with WT results for various mixtures, not only for dense-graded but also for some gap-graded mixtures. The R^2 values between the S_D and the rut depth of WT were found to be 0.95 for some mixtures, with 0.90 being the average as presented in earlier studies.

Since the S_D showed this high correlation with WT data, it is hypothesized that

the S_D can be a potential tool for measuring the rutting susceptibility of asphalt mixtures. In addition, as this test measures mixture strength in the static mode, it is relatively simple and practical to use. However, this procedure needs to be further evaluated through additional laboratory work (e.g., repeatability and loading speed) and field data. Therefore, this study, focusing on the field research, presents the results of correlation analyses of S_D with field rut depth and other laboratory mixture test data. The test methods used in this evaluation include APA, DLC, M_R and FCWT tests in addition to the WT test.

Regression analyses were performed between mixture S_D and rutting properties based on volumetric property and aging condition. Specifically, the objective of this study is to examine the correlation of S_D at 60°C with field and laboratory rutting data and to show the suitability of the test as a method for predicting rutting tendency of asphalt mixtures.

III. Research contents and scope

The magnitude and frequency of loads, environmental conditions and engineering properties of the asphalt mixture are major contributing factors to rutting. In this study, adopting a static loading, the frequency of load is not a concern and the environmental condition was assumed to be fixed at the temperature of 60°C in the laboratory. It is a well established concept that the rutting is a result of permanent deformation due to the combined stresses of compression and shear forces. This study hypothesized that rutting is a resultant deformation of the external loads inducing the deformation against the shear and compressive resistance of the asphalt mixture. Therefore, the rut resistance can be formulated as a function of the load creating compressive and shear stresses and the deformation induced. Based on this

hypothesis, a new static test protocol was developed for measuring deformation resistance of asphalt mixtures at a high temperature. The value measured by this test is called the strength against deformation or the deformation strength designated as “ S_D ” in this study. The S_D value is assumed to be a representation of rutting resistance level of the HMA mixture under a fixed laboratory condition.

A numerous number of HMA mixtures were used in the wheel tracking (WT) test and the field mixtures actually prepared for many highways in South Carolina were used for asphalt pavement analyzer (APA) test. The S_D test was performed for each mixture for which WT or APA tests was performed, and those results were compared to estimate correlation between WT and S_D or APA and S_D test values. The objective of this study is to establish S_D test protocol and suitability of the S_D as an engineering property for predicting rut tendency of asphalt mixtures at a high temperature.

At high temperatures, such as 60°C, asphalt concrete behaves rather plastic manner and mechanical tests used for elastic materials are not applicable to it. The Marshall Test has been accepted for measuring the integrity of asphalt mixtures for more than 50 years. However, it measures the resistance of the mixture against inward squeezing pressure, (*Kim et al 2004*), the loading mechanism of which is not similar to the loading on the pavement surface by vehicle wheels (*Li et al. 2001, 2002*).

The rutting of asphalt mixture at high temperature is a localized deformation at the area where the wheel pressure is applied. The mixture local resistance at the area where the load is directly contacted may be needed to correlate it with rutting potential of the mixture. Therefore, a test method which might account for the plastic deformation at the localized area before failure was developed. To simulate

a load-induced deformation which is similar to the one created by a static wheel sitting on pavement with a circular tire imprint, a loading head was invented for this test. The hypothesis is that if the load-deformation information of the loading through the head at 60°C is properly implemented in its calculation, the calculated strength would represent the resistance of mixture against deformation.

The deformation strength (S_D) test, developed based on this hypothesis, applies a load vertically to the flat surface of a specimen to create a concave form of deformation using the loading head having a round edge. This test, designated as "Kim Test," actually measure a static strength at peak point of the vertical load, inducing compressive stress and the shear stress which is considered to be the primary cause of rutting on asphalt pavement at high temperatures (*Brown and Gibb 1996*).

The loading head is an important medium in deformation strength test. Figure S-1 illustrates a loading head being pushed into an asphalt mixture at the depth of y , with D and r representing the diameter of loading head and the radius of edge curvature, respectively. When the loading head is pressed into the asphalt mixture, its edge contacts the mixture in a concave shape resembling a bowl.

The depth of this bowl is y and the top rim (the dotted circle in the Figure) has a diameter of $D-2r+2x$, making the cross-section area $A = \frac{\pi(D-2r+2x)^2}{4}$. The vertically projected cross-section area of the contact when the loading head is at depth of y from the specimen surface is referred to as A .

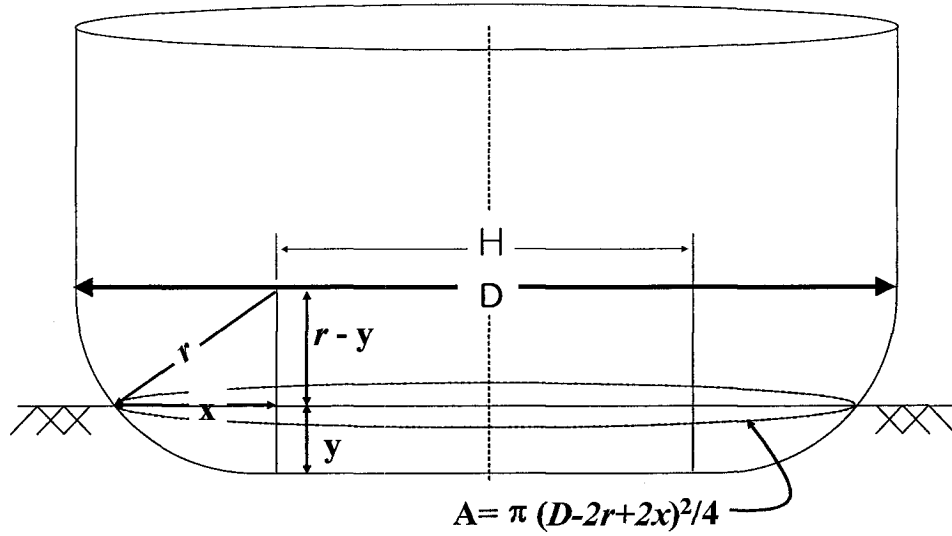


Figure S-1. Illustration of bottom edge of loading head.

The value of this cross-section area is a function of y varying from a minimum at $y = 0$ to a maximum at $y = r$. The SD is then calculated by dividing the maximum load P by the area $\pi(D-2r+2x)^2/4$. Since x is a function of r and y , the area becomes $\pi[D - 2(r - \sqrt{2ry - y^2})]^2 / 4$, a function of D , r and y , making

$$S_D = \frac{4P}{\pi[D - 2(r - \sqrt{2ry - y^2})]^2} \quad (1).$$

where S_D = Deformation strength (MPa)

P = Maximum load (N) at failure

y = Vertical deformation (mm) at P

D = Diameter of loading head (mm) and

r = Radius of loading head edge curvature (mm).

The strength calculated by Equation (1) is defined as the measure of strength

against the static deformation. In this equation, the S_D is a function of P , D , r and y . The loading head dimension denoted as $D(r)$ and r/D ratio were as found to be important for this test. To select an appropriate dimension, many loading heads having different D and r were evaluated. The results indicated that the value of r/D for obtaining relatively consistent output was 0.25 and the loading head of 40(10) was selected as the most reliable in normal aggregate size (10, 13 and 19mm) asphalt mixtures. Since the size variable D and r are fixed as 40mm and 10mm, respectively, the S_D equation is simplified as a function of P and y only.

$$S_D = \frac{0.32P}{(10 + \sqrt{20y - y^2})^2} \quad (2)$$

Using this equation, the strength is determined to be stronger or weaker if the mixture deforms less or more, respectively, under the same load.

The 1st year study was to establish test method of the deformation strength (S_D) and to evaluate suitability of S_D as a standard test procedure for permanent deformation evaluation of asphalt mixtures. Research contents are as follows.

- 1) Repeatability test was performed and estimated to verify deformation strength repetition. Test items were WT, ITS, Marshall stability, S_D .
- 2) Field simulated wheel tracking test pit and field circular wheel tracker (FCWT) were set up to reduce collection cycle of data by carrying expedited test. Correlation analysis was performed on deformation

strength and permanent deformation characteristics produced by field circular wheel tracker.

- 3) To analyze correlation S_D and air void change, AP contents was changed from 4.0 to 6.5% and asphalt mixtures were manufactured with SGC and OAC was determined. Also, asphalt mixture was made using different air void by changing number of gyrations by the SGC. And APA test was performed with $\phi 150\text{mm}$ specimen to analyze correlation of S_D .
- 4) Deformation strength after mixture's long term aging was carried out to estimate permanent deformation resistance after aging of mixtures. Gel-permeation chromatograph (GPC) test was performed to evaluate aging extents of mixtures. In the GPC evaluation, the increment ratio of the large molecular size (LMS), which has very high correlation with the viscosity of binder, was analyzed.
- 5) Correlation of field performance was analyzed by measuring S_D of core specimen taken in the mid lane and rut depths of both wheel paths at the same site in many existing street pavements. Regression analysis was performed using the average rut depth of both wheel path as dependent variable (y) and S_D value as independent variable (x) to find out correlation between the two properties. Figure S-2 illustrates the pavement cross sectional profile, the coring location and the rut depth of both wheel paths at a site of field pavement.

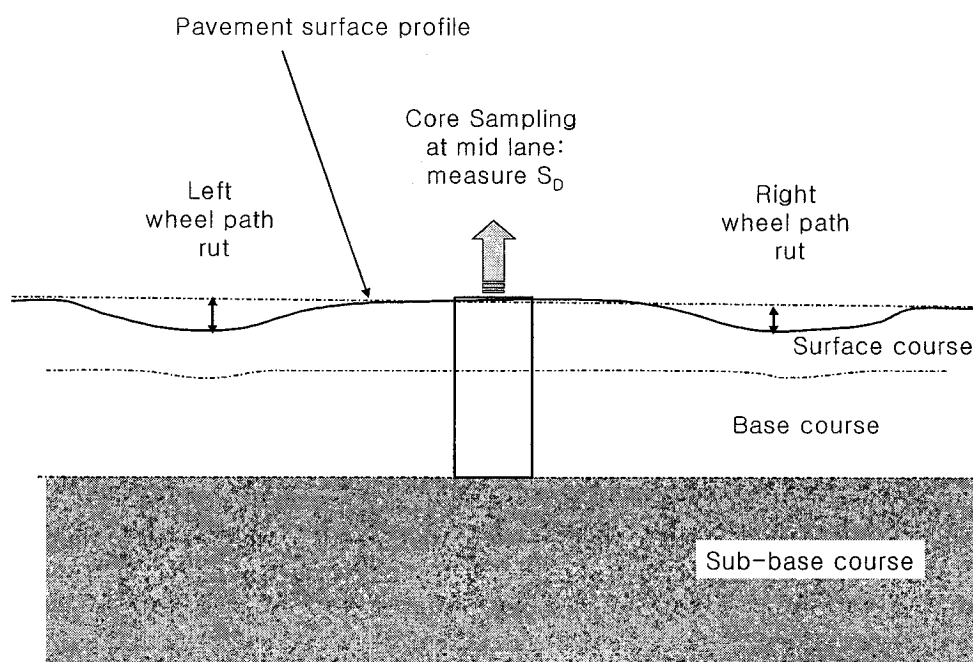


Figure S-2. Description of field pavement configuration and core site

The 2nd year study, to establish standard test method of deformation strength (S_D), various test procedures, size-related factors and simulated field and actual field evaluation were performed. The detailed contents are as follows.

- 1) The method of conditioning S_D specimens up to 60°C was determined. Two conditioning methods by drying oven and water bath were evaluated. The time of conditioning, S_D value level and coefficient of variation of S_D was evaluated for the two methods.
- 2) The values of S_D of 100mm specimens was compared with those of 150mm specimens. The appropriate conversion factor was to be determined from the test data for arterial highway pavement and

secondary class road pavement.

- 3) The appropriate radius (r) of edge round cut of loading head was analysed, and interaction of r and maximum aggregate size was analysed to determine suitable r size with the diameter of loading head of 40mm.
- 4) The loading speeds of 10, 30, 50 and 70mm/min were analysed to select optimum test speed based on the correlation with WT test results. The regression analyses were performed by aggregate type and size in the analyses.
- 5) The field-simulated circular wheel tracker (FCWT) test was performed to find correlation with S_D value of paved asphalt mixture types. Correlation analysis between the S_D values of cored specimens taken at the mid lane and field rutting data measured at the both wheel paths at the same site as the pavement evaluated in the first year, as shown in the Figure 2 above. Test pavement sites and several sites were added for this evaluation.
- 6) For the next year field rutting and S_D level analysis, test pavement sections were paved in four places. The S_D and WT tests were performed using field sample of those asphalt mixtures.
- 7) The dynamic load creep test was performed to estimate if the asphalt mixture having higher S_D will have strong resistance against dynamic

load creep deformation. Resilient modulus (M_R) at 40°C, which is relatively high and M_R -measurable temperature level, was measured to see if it is the property having good correlation with S_D values which were measured at 60°C.

The 3rd year study was to evaluate S_D suitability for special type pavement materials and to establish standard test protocol of deformation strength (S_D). Actual field evaluation and FCWT evaluation were performed three years in a row. The detailed contents are as follows.

- 1) The retained S_D ratio (RSR) was evaluated to determine the moisture susceptibility of asphalt mixture using S_D test. Two conditioning times, 24-hour and 48-hour submerging in the 60°C water, were evaluated. After submersion, S_D and WT tests were performed to find correlation of two test properties.
- 2) Applicability of S_D for the stone mastic asphalt (SMA), which is one of special asphalt pavement materials, was evaluated. The S_D and WT were applied for SMA to find out the correlation of WT vs. S_D .
- 3) The porous asphalt mixture (PAM) and open-graded friction course (OGFC) were also evaluated. The S_D and WT were applied for SMA and PAM, and S_D in Korea and APA were applied for OGFC in the United States.
- 4) The field-simulated circular wheel tracker (FCWT) test was performed

to find out correlation with S_D value of special type asphalt mixtures.

- 5) In the field study, correlation analysis between the S_D values of cored specimens taken at the mid lane and field rutting data measured at the both wheel paths at the same site, as shown in the Figure 2 above. A field test pavement section was paved in near Koomi area, Gyongsang Nam-do. Last-year test pavement sites and several sites were added for this evaluation.
- 6) Statistical analysis of S_D was performed to determine process mean (m) or mixing strength of S_D in mix design, based on critical S_D , probability of consumer risk and the coefficient of variation for 100mm specimen. From the study, the m values of the asphalt pavements for secondary class road and arterial highway were determined as mix design criteria.

IV. Research Results

The 1st year study was to establish test method of deformation strength and to estimate performance of field circular wheel tracker. The important research results of 1st year study are summarized as follows:

1. It was shown that the S_D of asphalt mixture was to be close relation with change of air void. If the air void of asphalt mixture was near 4% or a little lower, the S_D was found to be the maximum value.
2. In correlation analysis, the large molecular size (LMS) and S_D were clearly increased with increment of aging time. It is indicated that the

S_D have a good correlation with change of LMS. Therefore, the S_D was increased with the rut resistance increment due to aging.

3. It was found that the rut depth by FCWT is well distinguished for each mixture. The S_D of mixtures, which were randomly collected before placement for FCWT pit, showed very high correlation with the rut depth and dynamic stability evaluated by FCWT.
4. Correlation analysis of S_D and field performance showed that field rut depth and S_D of core taken at the same site had a high correlation ($R^2 > 0.5$).
5. Correlation of the S_D and the rut depth by APA was relatively high ($R^2 = 0.78$). Therefore, the S_D value is found to have good correlation with not only WT results, but also with APA results.
6. It was found that LMS and S_D was increased as time of long term aging increased. Specially, extent of aging was increased during early 24hr, but increment rate was slow down after that aging time.
7. Analysis results of repeatability test showed that correlation of 1st and 2nd S_D test was relatively high ($R^2 > 0.8$), which is much higher than that of other tests, such as Marshall Stability and indirect tensile strength, but similar to that of WT test.

The S_D data also showed high correlation with binder's $G^*/\sin\delta$ of its

binder with $R^2 > 0.90$ on the average under fixed aggregate gradation in addition to showing R^2 of 0.94 with the WT data and R^2 of 0.78 with the asphalt pavement analyzer (APA) data. It was possible to conclude that the S_D should be the strength property controlled by mixture's resistance against rutting.

The second year research was to evaluate practical applicability of the deformation strength (S_D) as an estimating technique of the high-temperature deformation resistance of asphalt mixtures. The important research results are summarized as follows:

1. The method of conditioning specimens up to 60°C in the drying oven took 2 hours, which is 4 times longer than the time of conditioning in water bath. The coefficient of variation of S_D values measured from dry-oven conditioned specimens was higher than that of the wet-conditioned specimens. Therefore, submerging specimen up to 60°C in water bath was found to be the appropriate method for conditioning specimen before S_D test.
2. The mean value of S_D of 100mm specimens was lower than that of 150mm specimens. The appropriate conversion factor should be determined from the test data to be collected as many as possible.
3. In the analysis of radius (r) of edge round cut of loading head and maximum size of aggregate, coefficient of variation of $r=10.5\text{mm}$ was greater than that of $r=10.0\text{mm}$. The reason is because of reduction of

flat area under the bottom of loading head due to r increase. Therefore, since $r=10\text{mm}$ showed less variation and was less affected by maximum aggregate size, $D=40\text{mm}$ and $r=10\text{mm}$ was determined as the appropriate dimension of the loading head.

4. In the analysis of loading speed, higher S_D was observed by increasing loading speed. It was assumed that the stress relaxation and horizontal shearing was the reason why the lower S_D was measured at lower loading speed. From the regression analysis between S_D and wheel tracking test results, the loading speed of 30mm/min was selected as an optimum for better correlation with WT results than any other speeds.
5. The field-simulated circular wheel tracker (FCWT) test results showed very strong correlation with S_D value of the mixture placed in FCWT pit. It was found that the stronger the S_D mixture, the higher the rut resistance.
6. For the field rutting and S_D level analysis, test pavement sections were paved in four places and the rut depth was be measured from next year. Correlation analysis between the S_D values of cored specimens taken at the mid lane and field rutting data measured at the both wheel paths at the same site in exiting road pavement. The R^2 value of over 0.7 was obtained from the accumulated data of field rut depth and core S_D values for two consecutive years.
7. The strong S_D mixture was observed to have lower dynamic load

creep rate, showing slower development of deformation under continuous repeated loading. From this analysis, therefore, it was estimated that the asphalt mixture having higher S_D would be strong against rutting in the field.

8. In resilient modulus (M_R) analysis, the M_R at 40°C, which is relatively high and M_R -measurable temperature, showed relatively high correlation with S_D values which were measured at 60°C. But M_R at 25°C, which is ambient temperature property, did not show good correlation with S_D .
9. In conclusion, the deformation strength (S_D) measured at 60°C was found to have good correlations ($R^2 > 0.7$) with WT test, APA test, dynamic load creep test, M_R at 40°C. More over, Since S_D showed good correlation not only with those laboratory test data, but also with field rutting data, it is concluded that, in spite of high variation of construction materials, S_D is an excellent index for estimating rut resistance of asphalt mixture.

It was possible to show that cut-off values of S_D could be determined based on SCDOT APA cut-off limits, 3mm for the arterial highway and 5mm for secondary highway. The values of S_D satisfying these APA requirements were estimated to be 4.0MPa and 3.0 MPa for the arterial highway and secondary highway, respectively.

The mixtures for APA test were prepared for practical use in various highway projects in South Carolina. Still the R^2 levels are considerably high

for civil engineering materials study. Therefore, it was concluded that possibility of using S_D as a promising tool of predicting rut potential of dense-grade asphalt mixtures was proved.

The 3rd year study was to evaluate S_D suitability for special type pavement materials and to establish standard test protocol of deformation strength (S_D). Actual field evaluation and FCWT evaluation were performed three years in a row. The important study results are summarized as follows.

1. The 48 hours submerging in the 60°C water was found to be appropriate time of conditioning for evaluating moisture susceptibility of asphalt mixture. But because the WT did not show consistent rut resistance depreciation, correlation of the retained S_D ratio (RSR) and WT result can not be found in the current study.
2. The S_D test results for SMA were found to be very poor compared with those of dense-graded asphalt mixtures, which show similar WT rut-depth level. The WT test results were also found to be very poor compared with those of dense-graded asphalt mixtures, which shows inferior performance to the SMA mixtures in the field pavement. Therefore, suitability of S_D test for SMA mixture was not validated in this study.
3. Similar to SMA mixtures, the S_D test results for PAM and OGFC were found to be very poor, compared with those of dense-graded asphalt mixtures. The correlation analysis of S_D with WT test result

was also found to be very poor, compared with those of dense-graded asphalt mixtures. Therefore, S_D test was found to be not suitable for special type mixtures.

4. The standard S_D test protocol was set up for the dense graded asphalt mixtures only and its details are as follows:

- ① For the loading head, the diameter (D) and radius of edge round cut (r) are 40mm and 10mm, respectively.
- ② For testing procedure, the specimen conditioning (submerging) time is 30 minutes at 60°C water and the loading speed is 30mm/min, as shown in Figure 3.
- ③ For preparation of specimen, the specimen should be compacted using a gyratory compactor for 75 and 100 gyrations for secondary class road and arterial highway, respectively.
- ④ The height of specimen should be 63 ± 2 mm, with the diameter of 100 mm or 150mm.
- ⑤ The minimum S_D value should be 3.2MPa and 4.25MPa for secondary class road and arterial highway, respectively, for the specimen diameter of 100mm.

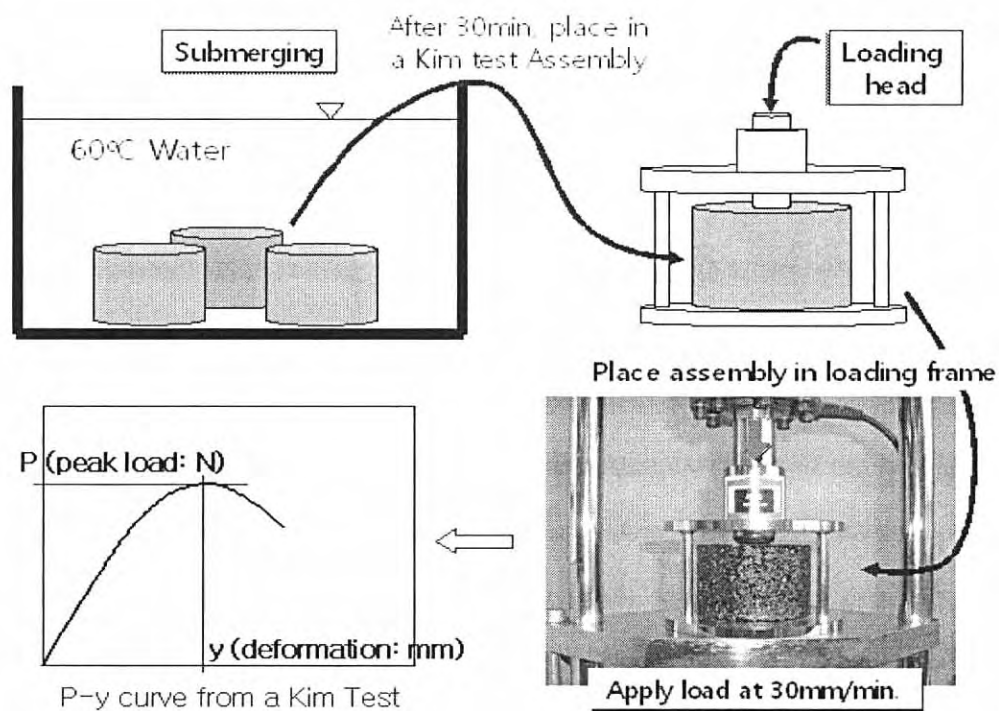


Figure S-3. A standard S_D test procedure.

5. The probability of consumer risk was selected as 10% from operation characteristics curve concept. The coefficient of variation (V_c) of S_D values was found to be 8.4% for asphalt mixture specimens with diameter of 100mm. Assuming S_D values follow a normal distribution, using the standard normal variate $z_{0.1} = -1.28$ and $n=3$ for 3 specimens, the minimum values of process mean were calculated as 3.2MPa and 4.25MPa for secondary class road and arterial highway, respectively.
6. Those minimum values are based on 30mm/min loading speed of S_D test. When the loading speed is 50mm/min, which is common setting for Marshall Testing machine, the values should be increased by 10%

for secondary road and 6% for arterial highway. The values suggested for 50mm/min speed testing were 3.5MPa and 4.5MPa for secondary class road and arterial highway, respectively.

7. There are always variation in the quality of product and the variation level is represented as the coefficient of variation (V_c). The process mean (m) depends upon the magnitude of V_c and the number (n) of test sample (specimen). Therefore, the m is function of V_c and n , with m being increased or decrease with V_c increase or decrease. With the same V_c , the m is decreased with the n increase. Therefore, since the suggested minimum S_D values are valid only for the case of $V_c = 8.4\%$ and $n = 3$, if the V_c is found to be larger using more data in the later studies, the m values should be suggested as larger values.

The important observation of this study is that the mixture with higher deformation strength (S_D) exhibited lower rut depth in wheel tracking (WT), asphalt pavement analyzer (APA) tests and FCWT and field evaluation, with considerably high R^2 values. Since, such high correlations were found in regression analyses of the S_D with the data from those proven test procedures and field data, it was concluded that the S_D test can possibly be considered as a reasonable procedure for estimating the rutting potential of asphalt mixtures. The S_D value can also be characterized as an engineering property which has fairly good relation with rut tendency of asphalt mixture at high temperature.

This study is an attempt to use a static test for rutting estimation and the

protocol and conclusions suggested in this study is as good as the assumption upon which these findings are reached. This study dealt with a numerous laboratory made data and field project data. Adopting this test for predicting rut performance of asphalt mixtures, it will be possible to take advantage of simplicity of testing procedure, affordability of equipment and saving time.

V. Application Plan of Research Results

The most important finding in this analysis is that the S_D value had high correlations with field rutting data as well as data from major laboratory test such as WT and APA. The WT and APA are known to be reliable rutting test procedures, being widely used in many developed countries. In analysis with field data collected for three years, the S_D exhibited fairly high correlations with actual road rut data ($R^2 \geq 0.7$), which is considered to be a very high level of R^2 value for field data under highly uncertain nature of civil engineering works.

This study evaluated the suitability of the deformation strength (S_D) as a method of predicting the rutting potential of asphalt mixtures. These findings, the high correlations between S_D and the field rut depth and APA rutting test data in addition to WT, indicated that the mixture with a higher S_D would showed a higher resistance to rutting. Therefore, it is concluded that the Kim Test is a comparable test process to the WT or APA and, the S_D , designated as "the deformation strength," is a suitable property for estimation of rutting potential of asphalt mixtures at 60°C.

The reason why the S_D , a static strength, shows such a high correlation with rutting property, is not easy to explain without considering several technical view points. The first point is to apply the load in the vertical direction of the specimen

surface, which is the same as the direction of compaction and wheel loading. Applying it in the direction of compaction is important from the standpoint of the aggregate arrangement in the mixture. Other tests such as Marshall Stability and ITS applied load in the different direction of compaction of the specimen.

The second point involves the loading head shape, which has a flat face at the center and circular curve at the edge. This loading head makes it possible to create the vertical compressive stress and the horizontal shear stress while being pressed into the mixture at 60°C. A dimple-shape deformation is created with the shear movement of mixture along the sideline at and near the top surface. The deformation process induced by the loading head consists of an initial consolidation and steady depression, leading to some lateral shear movement of materials with the load continuation. Cracking is then initiated after the peak load and propagated at tangential direction as a sign of failure due to wedging effect of loading head. Therefore, the load-deformation (P-y) curve up to the peak point represents the resistance characteristics of the material against deformation without (before) cracking.

The third point is to take into account the change in the cross-sectional area of the loading head based on the depth of depression (y) in the S_D calculation, making the mixture's susceptibility to deformation reflected in its strength value. Due to the semi-plastic nature of asphalt mixture at high temperature, it is possible to apply this concept to the S_D , which is not applicable to elastic materials.

It also showed high correlation with air void ratio (V_{air}) variation, maximizing at slightly below 4% of V_{air} and good repeatability than other test results, such as ITS and Marshall Stability, implying that S_D can be used as one of mix design criteria. It was found that the S_D test could also be accepted, after further testing and evaluation, as a test procedure providing a reasonable estimation of the rutting

potential of asphalt mixtures. Since this procedure is much simpler than the others used in this study, it can be employed in many levels of laboratories (e.g., field). It can be used in place of other rutting tests.

If the S_D is used in the mix design criteria, it might be one of the important factors in the optimum asphalt content (OAC) decision. The S_D can be a good choice for possible replacement of Marshall stability in the mix design criterion.

In addition, since a load is applied to the top surface, the S_D measured from the field core specimens can be used as a field quality control criterion, a procedure currently not allowed for indirect tensile strength in many agencies. In this case, securing appropriate depth of specimen is important for reliable test result, which should be further studied in following year study. However, due to damage by pressure water and saw blade in coring process, S_D would be not the same (somewhat low) as the one for the same diameter laboratory-prepared specimen. A study is needed to establish a conversion factor.

For general use of S_D in domestic asphalt pavement industry, designation of S_D in as a standard test procedure in Korea Industrial Standard (KS) will be promoted following adoption in mix design criteria. The criteria of existing mix design consisted of two physical properties (air void ratio or V_{air} and void filled with asphalt or VFA), Marshall stability (a load-bearing capacity), and flow (a deformation parameter). Among those, since many questions have been arisen for Stability and flow as being meaningless parameters, these two are to be replaced other meaningful engineering property(s) these days. Therefore, the S_D is to be adopted as a criterion in place of the Stability and flow in hot-mix asphalt mix design together with VMA, voids in mineral aggregate from 2009.

여 백

목 차

제 1 장 서 론	1
1. 연구개발 목적 및 범위	1
2. 연구 필요성	2
3. 연구방법 요약	3
제 2 장 국내·외 기술개발 현황	6
1. 국내기술동향	6
2. 국외기술동향	6
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	11
1. 연구개발 주요내용	11
가. 1차년도 성과 요약	11
나. 2차년도 성과 요약	13
다. 3차년도 연구방법 요약 및 수행내용	15
2. 사용재료	17
가. 아스팔트 바인더	17
나. 골재	18
3. 잔유변형강도 비(Retained S _D) 산정 연구	23
4. SMA(Stone Mastic Asphalt) 혼합물의 분석	34
가. 배합설계	34
나. 반복주행 (Wheel Tracking: WT) 시험	38
다. Kim-test	47
라. 상관성 분석	51
마. 원인 분석	58
5. 배수성 혼합물의 변형강도 분석	60

가. 국내 배수성 혼합물	60
1) 배합설계	60
2) 반복주행 시험	62
3) Kim-test	65
4) 상관성 분석	67
나. 미국 SC의 OGFC 혼합물	70
6. 현장 소성변형 및 코어의 변형강도	73
7. 현장원형모의주행 시험	85
8. 배합설계 적용 기준제시 및 표준 시험법 정립	102
가. 변형강도의 배합강도 설정	102
나. 변형강도 배합강도의 개념	102
다. 검사특성(Operation characteristics: OC)곡선의 응용	105
라. 배합강도 산정	107
1) 이론적 근거	107
2) 배합강도의 계산	110
마. 검사특성곡선의 작도	123
1) 표준편차를 고정하는 경우	124
2) 변동계수(V_C)를 8.4%로 고정하는 경우	124
바. 배합강도의 결정	130
9. 품질관리에의 적용성 평가	131
10. 종합 고찰	133
11. 결과 요약 및 결론	143
 제 4 장 연구개발 목표 달성도 및 관련분야에의 기여도	148
1. 연구개발 목표 및 평가의 착안점	148
가. 연구개발의 최종목표	148
나. 연구개발결과 평가의 착안점	148

2. 연구목표의 달성도	149
가. 연구개발 수행 진도율	149
나. 연구개발 목표의 달성	151
3. 관련분야 기술발전 기여도	152
가. 기술적 측면	152
나. 경제·산업적 측면	152
 제 5 장 연구개발결과의 활용계획	154
1. 연구성과	154
2. 연구성과 발표 논문	163
3. 활용계획	166
 제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	168
 제 7 장 참고 문헌	172
 별첨 자체평가의견서	177

CONTENTS

Chapter 1. Introduction	1
1. Research objectives and scope	1
2. Research necessities	2
3. Summary of research methods	3
 Chapter 2. Technical developmental trends	6
1. Domestic trends	6
2. Foreign country trends	6
 Chapter 3. Research development contents and results	11
1. Research development contents	11
2. Materials	17
1) Asphalt binder	17
2) Aggregate	18
3. Retained S_D Research	23
4. Analysis of SMA(Stone Mastic Asphalt) mixture	34
1) Mix design	34
2) Wheel tracking test	38
3) Kim-test	47
4) Correlation analysis	51
5) Cause analysis	58
5. Deformation Strength(S_D) analysis of porous mixture	60
1) Domestic porous mixture	60
2) OGFC(Open-Graded Friction Course) mixture of U.S.A	70

6. Deformation strength of field pavement placement and field cores	73
7. Field circular wheel tracker test	85
8. Mix design application standard proposal and standard test method establishment	102
1) Process mean establishment of deformation strength(S_D)	102
2) Concept of S_D process mean	102
3) Application of OC(Operation characteristics) curves	105
4) Calculation of process mean	107
5) Drawing a figure of OC curves	123
6) Determination of process mean	130
9. Estimation of application of quality control	131
10. Synthesis consideration	133
11. Summary of results and conclusion	143
Chapter 4. Achievement and Contribution of Research Development	148
1. Research development objectives and estimation's viewpoint	148
1) Final objectives of research development	148
2) Research development results and estimation's viewpoint	148
2. Achievement of research development objective	149
1) Progress rate of research development execution	149
2) Achievement rate of research development objectives	151
3. Contribution of technical development	152
1) Technical View	152
2) Economical and Industrial View	152
Chapter 5. Application Plan of Research Development Results	154

1. Research results	154
2. Paper of Research results	163
3. Plan of Practical Use	166
 Chapter 6. Foreign Science Technological Information Collected from Research Process	168
 Chapter 7. References	172

표 차례

표 3.1. 밀입도 혼합물 실험에 사용된 골재의 물리적 성질	19
표 3.2. SMA와 배수성 혼합물 실험에 사용된 골재의 물리적 성질	21
표 3.3. 각 혼합물에 대한 24시간 수침과 48시간 후의 잔유변형강도 비	24
표 3.4. 편마암, 화강암 혼합물의 반복주행 시험 결과	27
표 3.5. SMA 혼합물의 배합설계 기준	34
표 3.6. 혼합물 명칭	36
표 3.7. 배합설계 결과	37
표 3.8. 반복주행 시험의 결과	44
표 3.9. 100mm 코어 공시체의 변형강도	48
표 3.10. 선회다짐 공시체의 변형강도(150mm)	49
표 3.11. 배수성 혼합물의 배합설계 기준	60
표 3.12. 배수성 혼합물의 배합설계 결과	62
표 3.13. 배수성 혼합물의 슬래브 공시체 물성 결과	63
표 3.14. 배수성 혼합물의 반복주행 시험 결과	63
표 3.15. 150mm 공시체의 변형강도 결과	65
표 3.16. 100mm 코어 공시체의 변형강도 결과	66
표 3.17. 배수성 혼합물의 변형강도와 WT 시험결과	68
표 3.18. OGFC 혼합물의 OAC에서의 침강손실을 확인	70
표 3.19. OGFC 혼합물의 APA와 변형강도	71
표 3.20. 현장 소성변형 상태 및 코어 변형강도 자료	75
표 3.21. 시험 포설된 혼합물의 변형강도 특성	83
표 3.22. 시험 포설된 혼합물의 소성변형 특성	84
표 3.23. 1차 FCWT의 화강암 13mm 혼합물의 변형강도와 최종 침하깊이와의 관계	88
표 3.24. FCWT에 사용된 편마암 19mm의 변형강도와	

최종침하깊이와의 관계	91
표 3.25. 화강암 19mm의 FCWT 시험의 변형강도와 최종침하깊이와의 관계	94
표 3.26. 3차 FCWT의 13mm 밀입도와 배수성 혼합물의 변형강도와 최종 침하깊이와의 관계	97
표 3.27. 3차 FCWT 시험의 10mm 밀입도와 배수성 혼합물의 변형강도와 최종 침하깊이와의 관계	100
표 3.28. 골재 크기 및 종류별 변형강도 평균치 및 변동계수 (CV)	110
표 3.29. Comparison of Probability of acceptance for using two standard deviations.	126
표 3.30. 재하속도별 공시체 직경별 배합변형강도 평균의 최소치 기준	130
표 3.31. 표충용 가열 아스팔트 혼합물의 시험 기준 값	131

그림 차례

그림 2.1. Rotary asphalt wheel tester 모식도	9
그림 2.2. APA 시험기 내부	9
그림 3.1. 밀입도 혼합물 제조에 사용된 편마암 입도	20
그림 3.2. 밀입도 혼합물 제조에 사용된 화강암 입도	20
그림 3.3. SMA 혼합물 제조에 사용된 화강암 입도	21
그림 3.4. 배수성 혼합물 제조에 사용된 화강암 입도	22
그림 3.5. 편마암 정상(Dry) S_D 와 24, 48 시간 수침처리에 따른 S_D 비교 ..	25
그림 3.6. 화강암 정상(Dry) S_D 와 24, 48 시간 수침처리에 따른 S_D 비교 ..	25
그림 3.7. 수침 시간에 따른 RSR 비교	26
그림 3.8. 편마암 혼합물의 48시간 수침 전후의 WT rut depth 비교	29
그림 3.9. 화강암 혼합물의 48시간 수침 전후의 WT rut depth 비교	29
그림 3.10. 48시간 수침 전 후의 변형강도의 치의 분포	31
그림 3.11. 48시간 수침 전 후의 WT rut depth치의 분포(편마암)	31
그림 3.12. 48시간 수침 전 후의 WT rut depth치의 분포(화강암)	32
그림 3.13. 선회다짐기	37
그림 3.14. 선회다짐기의 다짐 메카니즘	38
그림 3.15. 슬래브 공시체 다짐기	39
그림 3.16. 슬래브 공시체를 반복주행 시험을 위해 자른 후 변형강도 시험을 위해 3개의 코어를 채취한 모습	40
그림 3.17. 반복주행 시험기	41
그림 3.18. 한국 산업 규격(KS)에 의한 동적안정도	42
그림 3.19. 새로이 제시된 동적안정도(DS_{new})의 개념도 (김광우 등 2006) ..	43
그림 3.20. 10mm SMA 혼합물의 WT 그래프	45
그림 3.21. 13mm SMA 혼합물의 WT 그래프	45
그림 3.22. SMA 혼합물의 동적 안정도 비교	47

그림 3.23. 100mm 코어 공시체의 변형강도 비교	49
그림 3.24. 선회다짐 공시체의 변형강도 비교(150mm)	51
그림 3.25. WT 침하깊이와 코어 공시체의 상관성 분석(10mm)	52
그림 3.26. WT 침하깊이와 코어 공시체의 상관성 분석(13mm)	52
그림 3.27. WT 침하깊이와 코어 공시체의 상관성 분석	53
그림 3.28. WT 침하깊이와 선회다짐 공시체의 상관성 분석	54
그림 3.29. 코어 공시체(100mm)의 변형강도와 선회다짐 공시체(150mm)의 상관성 분석	55
그림 3.30. 동적 안정도와 코어 공시체 변형강도의 상관성 분석	56
그림 3.31. 동적 안정도와 선회다짐 공시체 변형강도의 상관성 분석	56
그림 3.32. 동적 안정도와 최종 침하깊이의 상관성 분석	57
그림 3.33. 10, 13mm 배수성 혼합물의 반복주행시험 결과 (a) 10mm 배수성 혼 합물, (b) 13mm 배수성 혼합물	64
그림 3.34. 공시체별 변형강도와 WT시험의 최종침하깊이와의 상관관계(100mm)	68
그림 3.35. 공시체별 변형강도와 WT시험의 최종침하깊이와의 상관관계(150mm)	69
그림 3.36. 공시체별 변형강도와 WT 시험 최종침하깊이와의 상관관계(종합)	69
그림 3.37. OGFC 혼합물 전체의 APA rut depth와 S_D 의 상관성분석	72
그림 3.38. 굵은골재 최대치수별 OGFC 혼합물의 APA rut depth와 S_D 의 상관성분석	72
그림 3.39. (a) 현장코어 채취위치와 rut depth 측정에 대한 모식도, (b) 각 사이트에 대한 그림 설명	74
그림 3.40 현장 rut depth와 코어 공시체에 대한 변형강도와의 상관성 분석	76

그림 3.41. 코어채취 위치별 rut depth의 평균과 코어 공시체에 대한 변형강도 평균과의 상관성 분석	76
그림 3.42. 3년간 측정된 현장소성변형 깊이와 변형강도 측정치와의 상관성 분석	77
그림 3.43. 연도별로 측정한 소성변형 깊이와 변형강도의 상관성 분석	78
그림 3.44. 현진에버빌 앞 (홍천방향) 코어채취	78
그림 3.45. 안디옥 교회 앞 (홍천방향) 코어채취	79
그림 3.46. 현진에버빌 앞 (춘천방향) 코어채취	79
그림 3.47. 춘천시 신매리 농협 앞 코어채취	80
그림 3.48. 춘천시 서면 앞 (금산2리 방향) 코어채취	80
그림 3.49. 춘천시 팔미리 코어채취	81
그림 3.50. 경북 칠곡군 일반아스팔트 혼합물 시험포설	82
그림 3.51. 경북 칠곡군 L4E10 혼합물 시험포설	82
그림 3.52. 경북 칠곡군 RLDPE 혼합물 시험포설	83
그림 3.53. 시험 포설된 혼합물의 반복주행결과	84
그림 3.54. 08년 1차 현장원형주행 시험기에 포설된 표층 혼합물	85
그림 3.55. 08년 2차 현장원형주행 시험기에 포설된 표층 혼합물	86
그림 3.56. 08년 3차 현장원형주행 시험기에 포설된 표층 혼합물	86
그림 3.57. 1차 현장원형주행시험기의 침하깊이 측정 결과	87
그림 3.58. FCWT 시험에서 rut depth와 실험실 공시체 S_D 의 관계	89
그림 3.59. FCWT 시험에서 rut depth와 코어 공시체 S_D 의 관계	89
그림 3.60. 2차 현장원형주행시험기 편마암 19mm의 침하깊이 측정 결과	90
그림 3.61. 편마암 19mm FCWT 시험의 rut depth와 실험실 공시체 S_D 의 관계	92
그림 3.62. 편마암 19mm FCWT 시험에서 rut depth와 코어 공시체 S_D 의 관계	92
그림 3.63. 2차 현장원형주행시험기 화강암 19mm의 침하깊이 측정 결과	93

그림 3.64. 화강암 19mm의 FCWT 시험 rut depth와 실험실 공시체 S_D 의 관계	95
그림 3.65. 화강암 19mm FCWT 시험에서 rut depth와 코어 공시체 S_D 의 관계	95
그림 3.66. 3차 FCWT의 13mm 밀입도와 배수성 혼합물의 침하깊이 측정 결과	96
그림 3.67. 배수성 13mm FCWT rut depth와 실험실 공시체 S_D 와의 관계 ..	98
그림 3.68. 배수성 13mm FCWT 시험에서 rut depth와 코어 공시체 S_D 의 관계	98
그림 3.69. 3차 FCWT 시험의 10mm 밀입도와 배수성 혼합물의 침하깊이 측정 결과	99
그림 3.70. 배수성 10mm FCWT 시험에서 rut depth와 실험실 공시체 S_D 의 관계	101
그림 3.71. 배수성 10mm FCWT 시험에서 rut depth와 코어 공시체 S_D 의 관계	101
그림 3.72. APA rut depth vs. S_D relationship and PDF at each point for each variable	104
그림 3.73. Operation characteristics (OC) curve에서의 생산자 위험률(a)과 소비자 위험률(b), 그에 해당하는 합격 품질수준(p_o)과 허용 불량률(p_1)	105
그림 3.74. 아스팔트 혼합물의 임계변형강도(S_{DC})와 배합강도(m)의 관계	106
그림 3.75. 공시체의 수가 3일 경우 변동계수 (V_c)와 변형강도가 임계치 이하일 확률 (P_f)에 따른 증가계수의 변화	109
그림 3.76. 임계치 이하일 확률 P_f 를 10%로 할 경우 변동계수 (V_c)와 공시체 수 (n)에 따른 증가계수의 변화	109
그림 3.77. 일반도로 아스팔트 혼합물과 간선도로 아스팔트 혼합물의 변형강도(S_D) 분포 및 공정 평균	

(일반도로 $m=3.2$, 간선도로 $m=4.25$)	111
그림 3.78. 임계변형강도(S_{DC})가 3MPa인 일반도로 표층용 아스팔트 혼합물의 임의의 평균이 임계치 미만일 확률(P_f)을 5%로 제한할 경우 공시체 개수(n)와 변동계수(V_c)에 따른 배합강도(process mean)의 변화	112
그림 3.79. $S_{DC} = 3$ MPa인 일반도로 표층용 아스팔트 혼합물의 임의의 평균이 임계치 미만일 확률(P_f)을 10%로 제한할 경우 n 과 V_c 에 따른 배합강도(process mean)의 변화	112
그림 3.80. $S_{DC} = 3$ MPa인 일반도로 표층용 아스팔트 혼합물의 임의의 평균이 임계치 미만일 확률(P_f)을 15%로 제한할 경우 n 과 V_c 에 따른 배합강도(process mean)의 변화	113
그림 3.81. $S_{DC} = 3$ MPa인 일반도로 표층용 아스팔트 혼합물의 임의의 평균이 임계치 미만일 확률(P_f)을 20%로 제한할 경우 n 과 V_c 에 따른 배합강도(process mean)의 변화	113
그림 3.82. $S_{DC} = 4$ MPa인 간선도로 표층용 아스팔트 혼합물의 임의의 평균이 임계치 미만일 확률(P_f)을 5%로 제한할 경우 n 과 V_c 에 따른 배합강도(process mean)의 변화	114
그림 3.83. $S_{DC} = 4$ MPa인 간선도로 표층용 아스팔트 혼합물의 임의의 평균이 임계치 미만일 확률(P_f)을 10%로 제한할 경우 n 과 V_c 에 따른 배합강도(process mean)의 변화	114
그림 3.84. $S_{DC} = 4$ MPa인 간선도로 표층용 아스팔트 혼합물의 임의의 평균이 임계치 미만일 확률(P_f)을 15%로 제한할 경우 n 과 V_c 에 따른 배합강도(process mean)의 변화	115
그림 3.85. $S_{DC} = 4$ MPa인 간선도로 표층용 아스팔트 혼합물의 임의의 평균이 임계치 미만일 확률(P_f)을 20%로 제한할 경우 n 과 V_c 에 따른 배합강도(process mean)의 변화	115

그림 3.86. $S_{DC} = 3$ MPa인 표층용 아스팔트 혼합물 공시체 3개의 임의의 평균이 임계치 미만일 확률(P_f)이 5% 이하가 되기 위한 배합강도(m)	116
그림 3.87. $S_{DC} = 3$ MPa인 표층용 아스팔트 혼합물 공시체 3개의 임의의 평균이 임계치 미만일 확률(P_f)이 10% 이하가 되기 위한 배합강도(m)	117
그림 3.88. $S_{DC} = 3$ MPa인 표층용 아스팔트 혼합물 공시체 3개의 임의의 평균이 임계치 미만일 확률(P_f)이 20% 이하가 되기 위한 배합강도(m)	117
그림 3.89. $S_{DC} = 4$ MPa인 표층용 아스팔트 혼합물 공시체 3개의 임의의 평균이 임계치 미만일 확률(P_f)이 5% 이하가 되기 위한 배합강도(m)	118
그림 3.90. $S_{DC} = 4$ MPa인 표층용 아스팔트 혼합물 공시체 3개의 임의의 평균이 임계치 미만일 확률(P_f)이 10% 이하가 되기 위한 배합강도(m)	118
그림 3.91. $S_{DC} = 4$ MPa인 표층용 아스팔트 혼합물 공시체 3개의 임의의 평균이 임계치 미만일 확률(P_f)이 20% 이하가 되기 위한 배합강도(m)	119
그림 3.92. 일반도로용 표층용 아스팔트 혼합물에서 임의의 3개 공시체의 S_D 평균($\overline{S_D}$)이 $S_{DC}=3.0$ 미만이 될 확률을 나타내는 검사특성(OC) 곡선	121
그림 3.93. 간선도로용 표층용 아스팔트 혼합물에서 임의의 3개 공시체의 S_D 평균($\overline{S_D}$)이 $S_{DC}=4.0$ 미만이 될 확률을 나타내는 검사특성(OC) 곡선	121
그림 3.94. 일반도로용 표층용 아스팔트 혼합물에서 임의의 3개 공시체의 S_D 평균($\overline{S_D}$)이 $S_{DC}=3.0$ 이상이 될 확률을 나타내는 검사특성(OC)곡선	122

그림 3.95. 일반도로용 표층용 아스팔트 혼합물에서 임의의 3개 공시체의 S_D 평균($\overline{S_D}$)이 $S_{DC}=4.0$ 이상이 될 확률을 나타내는 검사특성(OC) 곡선	122
그림 3.96. P_f 가 주어질 경우 공정평균과 임계변형강도의 관계	123
그림 3.97. 일반도로용 혼합물의 불량률(percentage out of limit)을 기준으로 표준편차를 두 가지로 계산하여 합격확률을 나타낸 OC curves.	126
그림 3.98. 간선도로용 혼합물의 불량률(percentage out of limit)을 기준으로 표준편차를 두 가지로 계산하여 합격확률을 나타낸 OC curves.	127
그림 3.99. 일반도로용 혼합물의 양호율(percentage within limit)을 기준으로 표준편차를 두 가지로 계산하여 합격확률을 나타낸 OC curves.	127
그림 3.100. 간선도로용 혼합물의 양호율(percentage within limit)을 기준으로 표준편차를 두 가지로 계산하여 합격확률을 나타낸 OC curves.	128
그림 3.101. 일반도로용 혼합물과 간선도로용 혼합물의 불량률 (percentage out of limit)을 기준으로 합격확률을 나타낸 OC curves.	129
그림 3.102. 일반도로용 혼합물과 간선도로용 혼합물의 양호율 (percentage within limit)을 기준으로 합격확률을 나타낸 OC curves.	129
그림 3.103. 13mm 하중-변형곡선에서 골재골격(skeleton)의 Buckling 으로 인 해 곡선이 튀는 현상 (직경 100mm 공시체)	134
그림 3.104. 13mm 하중-변형곡선에서 골재골격(skeleton)의 Buckling 으로 인 해 곡선이 튀는 현상 (직경 150mm 공시체)	134
그림 3.105. 슬래브 공치체를 절단하여 만든 8각형 공시체의 치수	135

그림 3.106. 8각 슬래브 공시체에 대한 변형강도 시험에서 정점의 반복 현상 (13mmmm AP5 SMA)	136
그림 3.107. 8각 슬래브 공시체에 대한 변형강도 시험에서 2 정점의 반복 현 상 (13mmmm L4E10 SMA)	137
그림 3.108. 변형강도 시험에서 관찰된 밀입도 공시체가 편칭 전단에 의해 파괴되는 사면의 모식도 (유효 높이 60mm로 가정)	138
그림 3.109. 변형강도 시험에서 편칭 전단에 의한 파괴 시의 하중봉과 공시 체의 유효두께로부터의 공시체 소요 직경 모식도	138
그림 3.110. 3가지 공시체를 사용한 변형강도 시험 결과 및 그 증가율 비교	139
그림 3.111. 직경 150mm, 13mm 골재 SMA 공시체의 파괴모양	140
그림 3.112. 대각선 312mm인 13mm 골재, AP5 SMA 8각 공시체의 모양	140
그림 3.113. 대각선 312mm인 13mm 골재, AP5 SMA 8각 공시체의 파괴된 모양	141
그림 3.114. 대각선 312mm인 13mm 골재, AP5 SMA 8각 공시체의 표면 균열 이 거의 없이 파관된 모양	141
그림 3.115. 상기 그림 3.114 공시체의 표면 균열은 거의 없으나 바닥에 균 열로 파괴된 모양	142
그림 5.1. (a) 하중봉, 채하 몰드와 100mm 공시체, (b) 공시체를 몰드에 넣고 하중봉을 넣은 상태의 모습	161
그림 5.2. 개선된 배합설계 흐름도 (국토해양부 2008)	162

제 1 장 서 론

1. 연구개발 목적 및 범위

아스팔트 혼합물의 강도관련 특성치로 가장 널리 사용되는 것은 마셜 안정도이다. 이것은 약 60년 전에 개발된 미국의 마셜 시험법에서 혼합물을 다진 후 그것의 견고성(Integrity)를 측정하기 위해 사용되는 것으로 배합설계에서도 중요한 항목이다. 시험방법이 비교적 쉽고 간편하여 전 세계적으로 널리 사용되나 근래의 많은 연구에서는 안정도가 아스팔트 혼합물의 공용성과 상관성이 없음을 지적하고 있다. 즉, 배합설계에서 제시된 기준치보다 월등히 높은 안정도를 가진 혼합물에서 소성변형이 심하게 발생하는 등 아무런 상관성이 없어 안정도의 무용론이 제기되고 있으며 대체 특성치의 개발이 필요한 시점에 와있다.

기존 아스팔트 혼합물의 소성변형 저항성 평가방법으로는 반복주행(Wheel tracking: WT)시험, 아스팔트포장분석(Asphalt pavement analyzer: APA) 시험, 회복탄성계수(Resilient modulus: M_R) 시험, 동적 크리프(Dynamic load creep: DLC) 시험, 삼축 동적압축 시험 등이 있다. 하지만 이들은 대부분 동적 재하시험이고 장비가 고가이며, 시험방법이 비교적 어렵고 미숙련자의 경우 작은 환경변화에도 결과의 변동성이 크게 나타나게 되며 해석도 어려워 실용성이 떨어진다.

새로운 시험법은 비교적 이해가 쉽고, 장비가 간편하며 시험결과가 현장 공용성과 상관성이 높도록 현장 상태를 최대한 모사하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 이러한 조건을 만족하는 변형강도(Strength against deformation: S_D) 측정방법을 개발·실용화하기 위한 연구를 수행하였다. 이 변형강도는 지난 약 3년간 수행되어온 기초 연구에서 고온의 아스팔트 혼합물의 소성변형 특성과 상관성이 매우 높은 것으로 나타나고 있다.

그간의 연구는 주로 실내에서 여러 가지 혼합물을 사용하여 WT 시험

과 변형강도의 상관성을 분석하는 것이었고 혼합물에 따라 R^2 이 0.95 이상으로 높은 상관관계를 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 이의 실용화를 실현하기 위해 기존의 주요시험법과의 상관성 분석, 현장에서의 공용성과의 상관성 분석을 통한 타당성 입증과 구체적인 시험 방법 및 적용기준의 정립 등에 관한 연구를 수행하였다.

본 연구 개발의 최종 목표는 아스팔트 혼합물의 변형강도 측정법을 개발하고 이 시험법의 타당성을 현장 공용성과의 상관성 평가를 통하여 표준화된 소성변형 추정 방법으로 제시하는 것이다.

이와 같은 연구 목표에 따라 본 연구가 완수되면 얻어지는 최종 성과물은 다양한 아스팔트 혼합물의 소성변형 특성을 간편히 측정할 수 있는 한 차원 높은 시험 기법이 개발되는 것이다. 시험 기법에 포함되는 내용은 공시체의 준비부터 시험 대상 및 변형강도의 계산까지 실제 시험 방법, 시험 결과의 적용 및 범위 제시를 포함한다. 그리고 이 과정에서 시험 장치가 제작되어 사용되며 그 과정에 제원이 설정되지만 이는 최종 목표가 아니고 연구수행과정에서 이루어지는 사항이다. 기타 이 시험결과를 응용하여 발생할 수 있는 사항들은 본 연구의 범위에 포함되지 않는다.

2. 연구 필요성

소성변형 측정을 위하여 가장 널리 사용되는 것이 반복주행시험으로 왕복 윤하중에 의해 슬래브 공시체에 발생하는 침하정도를 측정한다. 이는 상대적으로 이해가 쉽고 비교적 공용성과 상관성이 높아 많이 사용되기는 하나 여전히 슬래브 공시체 제조용 다짐기와 반복주행 시험기의 구비는 부담스럽고 시간도 어느 정도 걸리는 번거로운 시험이다. 게다가 시험 결과가 배합설계 등에도 반영되지 못하므로 단순히 재료의 상대 비교용으로 이용되고 있어 보다 간편하고 실용성 있는 시험법의 개발이 꼭 필요하다.

따라서 기술적 측면에서 국내의 아스팔트 혼합물 연구는 거의 대부분 선진국의 시험 기법을 국내에 적용하는 수준이다. 하지만 외국에서 개발된

기술의 도입은 그들의 장비를 아울러 도입해야하는 입장에 처하게 되므로 국내 기술의 발전은 한계가 있다. 특히 아스팔트 포장의 소성변형은 심각한 문제로 막대한 국가의 예산이 매년 낭비되고 있음에도 우리 자체적인 시험 방법이나 평가 방법은 없다. 하지만 지금 개발하고자하는 시험 방법은 매우 간편하면서도 Wheel tracking 시험과의 상관성이 좋고 기술적으로도 이용에 어려움이 없어 보급이 쉬울 것이다. 그리고 간편히 공용성을 사전 추정할 수 있으므로 사용이 활성화되어 기준을 체계적으로 정립할 경우 국내 아스팔트 혼합물의 수준을 한 단계 향상시키는 계기가 될 것이다. 즉, 비교적 손쉬운 방법인 외국의 Wheel tracking 시험법을 도입한다 해도 그 장비 등의 구비에 상당한 예산이 소요되고 번거로워 연구용으로도 아니라면 활성화가 어렵다. 그러나 본 개발 기술은 현장 실험실에서 마샬시험을 수행하는 정도의 수준이면 누구나 사용할 수 있어 적용성이 높고 현장의 품질관리 기준으로 적용이 가능하여 매우 필요한 시험법이다.

경제 산업적인 측면으로 볼 때, 앞서 언급한대로 국내의 아스팔트 포장 연구는 대부분 선진국의 시험 기법 및 장비에 의존하므로 국내 기술의 발전은 한계가 있다. 하지만 본 시험법이 국내의 표준 시험법으로 정착된다면 고가의 외국 장비들의 도입을 줄일 수 있고 그에 따른 경제적 이득도 클 것이다. 또한 실험의 효용성이 크므로 이를 통해 소성변형을 제어하기 위한 노력이 배가되므로 아스팔트 포장의 조기 손상에 따른 국가 예산의 낭비를 크게 줄여줄 수 있을 것이다. 또한 이 시험법이 국내에서 성공적으로 보급되어 효과가 입증될 경우 외국으로의 장비 보급에 따른 경제 효과도 상당할 것으로 판단된다. 따라서 본 연구가 완수될 경우 시험기의 제원을 표준화하여 국내의 시험기기 생산업체에 이를 보급하여 판매토록 할 것이다.

3. 연구방법 요약

1차 년도에서 전반기는 기존의 연구에서 제시된 시험의 방법 정립에 주안점을 두고 연구를 수행했고, 후반기는 공용성 평가에 주안점을 두고 현장

주행시험 피트를 설치하여 시험포설을 수행하였고 현장 공용성과의 상관성 분석을 수행하였다.

변형강도의 시험방법 정립을 위하여 시험결과의 반복성 검증, 최적 재하속도 선정, APA 시험과 변형강도와의 상관성 분석, WT 시험 특성과 변형강도와의 상관성 분석을 수행하였다.

변형강도와 공용성과의 상관성 평가를 위하여 변형강도와 공극(밀도)과의 상관성 연구, 노화에 따른 변형강도의 변화 분석, 대형분자와의 상관성 분석, 현장주행시험 장치에 시험포설 후 주행시험에 따른 자료 수집 등의 연구를 수행하였다. 특히 아스팔트 혼합물의 공극률은 배합설계 시 가장 중요한 변수이므로 공극률과 변형강도의 상관성 연구는 향후 이 특성을 배합설계의 변수로 적용하기 위한 가능성을 파악하는 사전 연구로서 매우 중요하다. 또한 기존 도로포장에서 소성변형의 정도에 따른 변형강도를 보기 위하여 소성변형 발생지역 도로에서 코어를 채취하여 변형강도를 통한 현장 공용성과의 상관성을 분석하였다.

2차 년도는 시험조건 정립 및 현장 공용성과의 상관성 분석에 주안점을 두고 연구를 수행하였다. 변형강도의 시험조건 정립을 위하여 수침/건조가열 후의 변형강도의 비교 분석, 하중봉의 직경에 따른 골재 치수별 영향에 대한 변형강도 분석, 동적 크리프와 변형강도의 상관성 분석을 수행하였으며, 회복탄성계수와 변형강도의 상관성 분석은 수행하였다.

또한 공용성과의 상관성 분석을 위하여 시험 피트 포장에 원형모의주행에 의한 자료를 수집하여 변형강도와 상관성 분석을 수행하였으며, 국내외의 기존 도로포장에서 소성변형의 정도에 따른 변형강도를 보기 위하여 소성변형 발생지역 도로에서 코어를 채취하여 변형강도를 통한 현장 공용성과의 상관성을 분석하였다. 또한 실제 현장 시험포장을 포설하여 공용 후에 상관성을 분석하기 위하여 시험포장을 포설하였다.

3차 년도는 밀입도 아스팔트 혼합물이 아닌 주로 특수한 혼합물에 대한 변형강도의 적용가능성을 확인을 위한 연구와 변형강도 시험법의 정립을 통

한 표준화이다. 즉, 특수포장 재료의 공용성과 변형강도의 상관성 분석 및 시험법 적용기준 정립을 위한 연구를 수행하였다.

3차년도의 연구 목적을 달성하기 위하여 특수포장용 혼합물의 S_D 의 분석, 특수포장 혼합물의 공용성과 S_D 의 상관성 분석하였다. 그리고 현장공용성과의 상관성 종합 평가, 잔류 변형강도비 시험 방법 설정을 위한 시험 등을 통하여 표준시험법 제시 및 시험기 제원 결정, 배합설계에의 적용 방안, 품질관리 시험에의 적용방법 등을 제시하는 것이다.

또한 원형모의주행시험 피트에 특수 혼합물(SMA, 배수성)을 포설하여 공용성과의 상관성 분석 자료를 수집하고 변형강도와 상관성 분석을 지속적으로 수행하였으며, 국내의 현장공용성과의 상관성 분석뿐 만아니라 외국의 실제 도로에 사용될 혼합물의 변형강도 분석을 수행하였다. 또한 당해년도 시험포장은 강원도 지역이 아닌 여름철 포장의 심한 고온 현상과 중차량 교통량이 많은 경상북도 구미시 외곽을 선정하여 현장의 공용 후에 상관성을 분석하기 위하여 포설하였다.

제 2 장 국내·외 기술개발 현황

1. 국내기술동향

아스팔트 포장의 소성변형을 방지하기 위한 연구는 많은 연구자에 의해 이루어지고 있다. 하지만 그들 대부분은 재료의 개발 및 적용에 관한 것이고 본 연구와 같이 정하중에 의한 소성변형 추정 시험법은 국내에서는 거의 연구가 이루어지고 있지 않다. 하지만 이와 같은 특성의 개발이 필요한 점은 일부 연구에서 지적되고 있으며 한국건설기술연구원을 중심으로 마샬시험법의 대체 특성 개발에 필요함을 인식하고 있었다. 그리고 외국 시험법의 국산화 일환으로 선회다짐기 제원의 개발, WT 시험기의 국산화 및 방법 연구 등이 진행되고 있는 정도이다.

따라서 본 연구는 새로운 독창적인 연구이며 이것이 성공적으로 개발될 경우 혼합물의 성능 측정은 물론 국내 배합설계의 한 특성치로 적용도 가능할 것으로 판단되어 본 연구를 수행하였다. 이에 발맞추어 한국형 도로포장 설계법 연구에서 아스팔트 혼합물의 배합설계방법 개선 연구가 진행되면서 소성변형에 보다 강한 혼합물 제조를 위해 본 연구에서 개발된 변형강도를 도입하는 방안이 검토되었다.

그리고 변형강도가 실용적이며 효과적인 시험방법으로 인정되어 2008년 제정된 국토해양부의 배합설계 잠정지침에 변형강도가 배합설계의 변수로 도입되어 2009년 정식 기준으로 채택될 예정이다. 이는 그간 외국기술 의존 일변도의 경향에서 벗어나 국내에서 개발된 시험법을 국내의 규정에 도입하는 매우 고무적인 일이라 할 수 있으며 국내 개발된 시험법을 인정하는 선도적 전례를 남기는 것이라 할 수 있다.

2. 국외기술동향

소성변형(rutting)은 국내는 물론 전 세계적으로 아스팔트 포장의 공용수명을 단축시키는 중요한 손상으로 막대한 국가예산의 손실을 유발하고 있

다. 이 손상의 주된 원인으로는 차량의 重量化, 대형화와 이상 고온 등 외적 환경요인 변화에 따른 내적요인 (아스팔트 재료)의 저항력 한계를 들 수 있다. 따라서 재료 성능 향상을 통해 환경요인을 극복하기 위한 많은 연구가 국내외적으로 진행되고 있으나 제조된 혼합물을 사전에 평가할 수 있는 간편한 시험 방법에 대한 연구는 거의 없다. 만일 보다 간편하게 아스팔트 혼합물의 고온 내 변형성을 측정할 수 있는 시험법이 있다면 변형에 취약한 재료를 배합설계 단계부터 검증 할 수 있을 것이다.

아스팔트 포장의 소성변형 문제 해결을 위한 연구는 크게 바인더 연구와 혼합물의 연구로 나뉜다. 바인더 연구는 폴리머 등 각종 첨가제로 아스팔트의 성능을 향상시키기는 연구, 미국 SHRP (Strategic highway research program) 연구에서 개발된 바인더 등급 체계의 개선 등이 있다. SHRP에서는 아스팔트의 유변학적 특성 (rheology) 분석 방법으로 동적 전단 유동시험기 (Dynamic shear rheometer: DSR)를 사용해 혼합물의 소성변형 추정을 가능케 하고 있다. 하지만 이 DSR 시험법은 바인더에만 국한된 것으로 사용되는 골재의 변화를 고려하지 못하며 또한 비교적 이해가 어렵고 장비가 비교적 고가인 문제가 있다. 혼합물 연구는 골재의 입도개선이 주를 이룬다. 독일에서 개발된 골재의 맞물림을 근간으로 하는 Stone mastic asphalt (SMA)가 가장 대표적이며 미국 SHRP 연구에서 개발된 Superpave 입도 등이 있다.

하지만 이들은 모두 재료 자체의 개발이지 혼합물 성능을 평가하기 위한 것은 아니다. 문헌 조사에 의하면 소성변형 관련 시험법 연구는 회복탄성계수 (Resilient modulus: M_R) 시험, 반복주행 (Wheel tracking: WT)시험, 노팅햄 시험(Nottingham test), 동적 크리프 (Dynamic load creep) 시험, 삼축 동적압축 시험 등 대부분이 동하중 하에서 이루어지는 특성을 분석하는 것으로 본 연구와 같은 정하중 연구는 없다.

아스팔트 혼합물의 소성변형관련 단순 공용성능 시험법(Simple performance test: SPT)의 제시를 위해서 몇몇 연구가 이루어 졌다. 그

한 예로 Witzak은 세 가지를 이 SPT의 후보로 거론하였는데 이는 동적 계수 (dynamic modulus), 정하중 크리프 시험 (static creep test)와 반복 하중 영구변형시험 (repeated load permanent deformation test). 일부 연구에서는 펀치테스트 개념으로 아스팔트 혼합물을 평가하는 시도가 있었다.

Jimenez는 아스팔트 혼합물의 2중 펀치 인장력 측정방법과 아스팔트포장재료의 내구성을 측정하였다. 가열아스팔트 혼합물의 전단 저항성측정방안의 하나로 단축 침입 시험이 시도되었다. 그들은 바닥이 평편한 직경 28.5mm의 원형 강봉을 통해 정하중과 동하중을 가하여 HMA의 소성변형 가능성을 추정하기 위하여 삼축 압축 시험과의 상관관계를 조사하였다. 정하중 크리프 시험법도 HMA의 소성변형 잠재력 평가를 위해 사용되었다. 그러나 이렇게 추천된 소성변형 추정 시험법들은 실험실에서 널리 사용되지 않았다. 그러므로 여전히 아스팔트 혼합물의 소성변형 잠재성 추정을 위해 단순한 시험법의 개발이 필요한 실정이다.

가장 최근에 미국 Pine Instrument사에서 개발하여 보급하고자하는 소성변형 특성 관련 시험기는 공시체를 3회로 굴리며 변형 깊이를 측정하는 Rotary asphalt wheel tester이다(그림 1.1). 이 장비는 슬래브 공시체를 만들지 않고 직경 150mm 선회다짐 공시체를 쓴다는 장점은 있지만 분당 60-90회의 회전력을 60°C에서 30,000회까지 가하며 여전히 동적하중 재하를 하는 시험법이다. 또한 미국에서 개발된 Asphalt Pavement Analyzer (APA) 시험기 역시 직경 150mm 선회다짐 공시체를 쓰는 시험법이나 고무바퀴대신 고압 고무호스 위를 금속바퀴가 왕복한다(그림 1.2). 온도는 수퍼페이브 바인더 규격의 온도로 조정이 가능하며 분당 60회 씩 8,400회 왕복하고 최종 깊이를 잰다. 따라서 이들 대부분 동적 재하시험이고 장비가 고가이며, 시험방법이 비교적 어렵고 결과에 변동성과 시험 오차가 크다는 특징이 있어 지금도 계속 개선을 하고 있다.

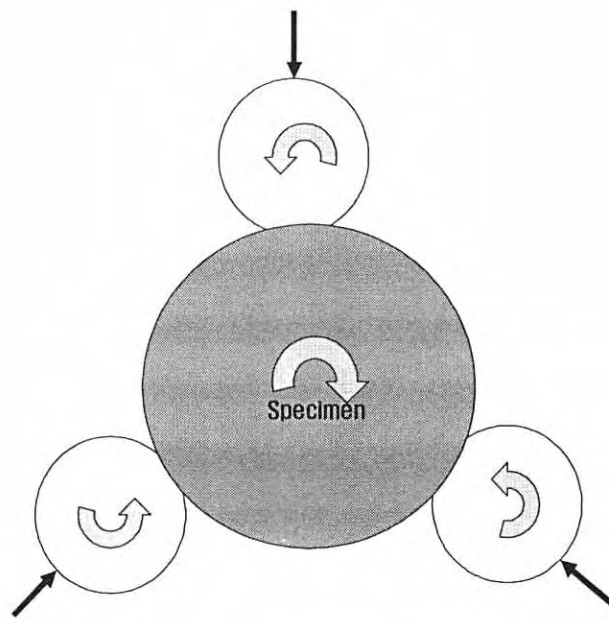


그림 2.1. Rotary asphalt wheel tester 모식도

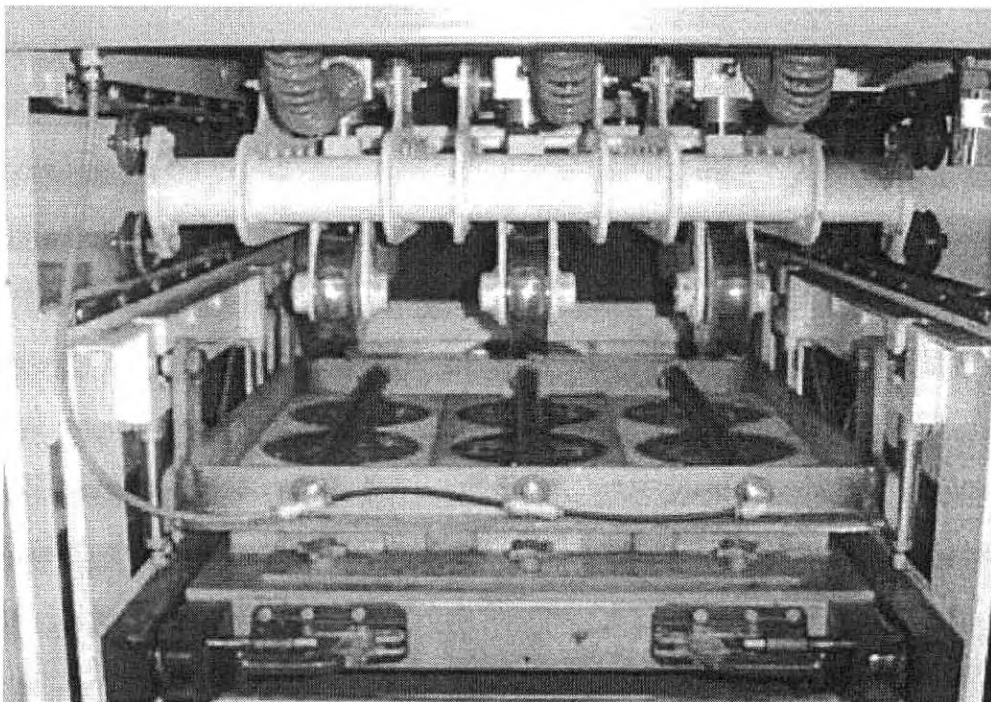


그림 2.2. APA 시험기 내부

따라서 국내는 물론 국외의 경우도 본 연구와 유사하거나 같은 연구가 이루어진 것은 없이 대부분이 동하중 시험법을 개발하고자 하였다. 또한 본 내용의 논문이 게재된 유럽의 Road Materials and Pavement Design (RMPD)나 Construction and Building Materials 저널 심사 시에도, 또한 미국, 프랑스 등 외국 학술 발표에서의 논문 발표시에도 본 시험법의 유사성을 제시한 적은 전혀 없었다.

따라서 본 연구에서 지금까지 개발한 시험법은 독창적이고 시험법이 간편하고, 결과의 이해가 쉬우며 하중봉과 공시체 홀더만 준비하면 기존의 하중재하 장비를 사용할 수가 있다. 또한 얻어진 변형강도 값이 실내 시험을 통한 소성변형 특성과의 상관성이 우수할 뿐 만 아니라 현장 공용성과의 상관성도 양호한 것으로 확인되었으므로 실용성이 클 것이다.

제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

1. 연구개발 주요내용

가. 1차년도 성과 요약

- 1) 변형강도는 아스팔트 혼합물의 공극률 변화와 밀접한 관계가 있으며 다짐의 증가로 공극률이 4%에 가까워지면 변형강도가 높아지며 4%를 약간 하회하면 최대의 변형강도를 이루는 것을 알 수 있었다. 따라서 아스팔트 혼합물의 소성변형 저항성이 공극과 밀접한 관계가 있고 변형강도도 아스팔트 혼합물의 공극률과 관계가 있어 이를 배합설계의 변수로 적용할 경우 공극과 함께 원만히 활용할 수 있을 것으로 판단되었다.
- 2) 대형분자와의 상관성 분석에서, 노화 시간의 증가에 따라 대형분자 (Large Molecular Size: LMS)의 증가가 뚜렷하게 나타났으며, S_D 는 그 LMS 변화에 양호한 상관관계를 가짐을 알 수 있었다. 한편 Styrene-butadiene-styrene (SBS) 개질 바인더인 PG76-22는 노화 시간의 증가에 따라 LMS가 크게 증가하여 산화(Oxidation)가 높은 반면, Low-density polyethylene (LDPE) 개질 바인더는 LMS 양이 그리 높지 않았으며 이것이 S_D 값으로도 나타났다.
- 3) 현장모의 원형 주행 장치 (Field-simulated circular wheel tracker: FCWT)에 의한 침하깊이는 각 혼합물의 소성변형 특성을 잘 대변하는 것으로 나타났다. 또한 4가지 포설당시 혼합물로 제조한 변형강도는 FCWT에 의한 최종침하깊이 및 동적안정도(DS)와 매우 높은 상관관계를 보여 향후 이를 발전시키면 좋은 시험장치가 될 것으로 평가되었다. 반면에 코어채취한 공시체에서 측정한 S_D 는 전체적으로

낮았으나 FWCT 결과와의 결정계수(R^2)가 0.7 이상으로 상관성은 양호하였다.

4) 변형강도와 현장 공용성과의 상관성 분석을 위하여 현장 침하깊이와 그 부위에서 채취한 코어의 변형강도를 측정한 결과 상관성이 높은 것으로 나타났다 ($R^2 > 0.75$). 변형강도가 현장 소성변형 특성과 매우 우수한 관계가 있음을 나타냈다. 현장의 혼합물 종류와 구분 없이 여러 변수에 의한 변동요인에도 불구하고 현장 데이터에서 매우 높은 수준의 결정계수를 나타냈다.

5) 변형강도와 APA 침하깊이와의 상관성은 $R^2 = 0.78$ 로 높게 나타났다. 그러나 공극률과 변형강도는 $R^2 = 0.76$ 로 상관관계가 상당히 양호하였으나 APA는 공극률 변화에 따른 침하깊이와의 상관성이 $R^2 = 0.13$ 으로 매우 낮은 것으로 나타났다. 따라서 변형강도가 공극률 변화를 통해서도 소성변형 저항성의 예측 가능성이 높은 것으로 판단되었다.

6) 장기노화의 시간이 길어질수록 대분자량의 증가와 변형 강도가 증가한 것을 알 수 있다. 노화의 시간의 증가에 따라 대형분자 (LMS)의 증가가 뚜렷하게 나타났다. 특히 노화상태의 진전은 초기 24시간 사이에 크게 증가되었고 그 이후로는 증가 추세가 완만하게 나타나 인공노화 초기에 주로 급속한 노화가 나타났다. LMS의 양의 증가에 따라 변형강도 값이 증가하였으며 상관성도 좋은 것으로 나타났다.

7) 반복성 시험 분석결과, 변형강도의 1, 2차 시험간의 상관성은 여타 시험방법들보다 월등히 높게 나타났다. 그 결과는 최대 $R^2 = 0.95$ 부터 적어도 $R^2 = 0.78$ 이상이어서 두 차례 시험이 비교적 좋은 반복

성을 보였다. 두 번째로 높은 상관성을 보인 시험법은 반복주행시험 (Wheel tracking: WT) 이었다. 두 번에 걸친 시험 간에 WT는 $R^2 = 0.67$ 의 상관성을 보였다. 마찰 안정도가 그 다음이었으며 간접인장 강도 시험은 매우 불량한 상관성을 보여 반복성이 낮은 시험임을 알 수 있었다.

- 8) 변형강도의 최적재하속도 시험결과, 이제까지의 시험으로는 어떤 뚜렷한 경향을 파악하기는 힘들어, 향후 수침 및 건조가열 적정시간 선정 연구와 병행하여 최적 재하속도를 결정해야 할 것이다.

나. 2차년도 성과요약

- 1) 건조오븐에 공시체를 넣고 60℃로 가열하는 방법은 공시체 내부가 시험온도인 60℃가 되는데 2시간이 걸려 30분 만에 가열되는 수침방법에 비해 시간이 4배 오래 걸렸다. 건조가열로 측정된 S_D 는 수침가열에 비해 다소 높게 나타났으나 변동계수가 더 커서 변동성이 높았다. 따라서 건조가열은 시간이 더 오래 걸리고 변동성도 더 높아 이 보다는 수침가열이 더 좋은 방법이라 판단되어 표준 방법으로 채택하였다.
- 2) 공시체 직경 100mm의 S_D 평균은 150mm 공시체의 평균보다 적게 나타나 공시체 직경에 따른 차이가 큰 것을 알 수 있었다. 그 차이는 보다 많은 data를 통해 환산하도록 하였으며 100mm 공시체보다 150mm의 경우 평균 10%를 증가시켜 함을 알 수 있었다.
- 3) 하중봉의 원형절삭 반경 분석에서 같은 골재 내에서 r 의 차이에 따른 변동성은 $r=10.5\text{mm}$ 가 다소 커서 r 의 증가에 따라 평편한 밑면이

줄어드는 것이 변동성을 증가시킨 원인인 것으로 보여 진다. 특히 골재 크기에 의한 영향도 $r=10\text{mm}$ 이 적어 하중봉은 $D=40\text{mm}$ 에 $r=10\text{mm}$ 가 안정적인 시험결과를 얻는 것으로 나타났다.

- 4) 재하속도 연구에서 변형강도 값은 재하속도가 증가함에 따라 같이 증가하는 경향을 보인다. 따라서 재하속도가 느릴수록 응력이완 현상 및 수평 전단유발에 의해 변형강도가 낮게 측정되는 것으로 추정된다. 재하속도별로 얻어진 S_D 값과 WT 시험결과와의 상관성 분석을 통해 30mm/min 의 속도가 가장 적합한 것으로 선정되었다.
- 5) 모의주행시험장치(Field-simulated circular wheel tracker: FCWT)에 의한 변형강도의 현장 적용성 평가 결과 혼합물별 FCWT에서 소성 변형에 대한 강약이 S_D 의 강약과 상관성이 매우 높게 나타남을 알 수 있었다.
- 6) 현장 소성변형 특성분석을 위해 시험포장을 수행하였으며 소성변형이 발생하는 3차 년도부터 변형강도와의 상관성 분석을 수행한다. 그 외에 1차 년도에 도로현장에서 소성변형 깊이를 측정하고 같은 곳에서 코어를 채취하여 변형강도를 측정하여 상관성을 분석한 결과 2년간의 R^2 이 0.7이상으로 양호하게 나타났다.
- 7) 변형강도가 큰 것은 동적크리프가 작아 혼합물의 변형 진행이 느린 것으로 나타났다. 이로부터 변형강도가 높으면 동하중하에서 혼합물의 변형이 늦게 진전되므로 소성변형에 강할 것임을 변형강도와의 상관성분석을 통해서 알 수 있었다.
- 8) 회복탄성계수(M_R)의 측정이 가능한 비교적 고온인 40°C 에서의 M_R 은

S_D 와 비교적 높은 상관관계를 보였다. 하지만 상온(25°C)에서의 M_R 은 상온상태 특성이므로 고온특성인 S_D 와 상관성이 낮은 것으로 나타났다.

- 9) 종합적으로 변형강도는 고온(60°C)에서 수행되는 반복주행시험(WT), APA 시험, 동적크리프시험은 물론 40°C 에서 수행된 M_R 과도 모두 R^2 이 0.7 이상으로 양호한 상관관계를 가지는 것을 확인할 수 있었다. 게다가 현장 소성변형 특성과도 상관관계가 좋아 변동성이 큰 건설재료의 특성을 고려한다면 변형강도는 매우 우수한 아스팔트 혼합물의 공학적 특성치라 할 수 있다.

다. 3차년도 연구방법 요약 및 수행내용

3차 년도는 밀입도의 박리특성을 변형강도로 파악하기 위해 잔류변형강도 비의 산정방법 연구, 밀입도가 아닌 특수한 혼합물에 대하여 변형강도 적용가능성을 확인하기 위한 연구 및 시험법의 정립 연구를 수행하였다.

특수 아스팔트 혼합물로는 SMA 혼합물, 배수성 혼합물, 미국의 OGFC 혼합물 등의 변형강도 분석을 수행하여 적용성 여부를 평가하였다. 또한 시험 피트 포장에 혼합물을 포설하고 공용성과의 상관성 분석을 위하여 원형모의주행에 의한 자료를 수집하고 변형강도와 상관성 분석을 지속적으로 수행하였으며, 국내 도로에서 코어를 채취하여 변형강도를 통한 현장 공용성과의 상관성 분석뿐만 아니라 국외의 실제 도로에 사용되는 혼합물에 대한 변형강도 시험 연구도 지속하여 수행하였다. 끝으로 당해 연도의 시험포장 포설은 춘천인근이 아닌 여름철 고온현상이 심한 경북 구미 지역을 선정하여 현장의 공용 후에 상관성을 분석하기 위해 시험포장을 포설하였다. 이를 보다 구체적으로 정리하면 다음과 같다.

- 1) 잔류변형강도를 통해 혼합물의 박리저항성 측정 가능성을 확인하는 시험방법 개발을 위하여 24시간 수침과 48시간 수침 중 적합한 방법을 찾고자 하였다 [밀입도 19mm, 13mm의 2가지 입도와 2종류 골재(편마암, 화강암). 바인더 4 종류: AP-5, CRM 10% (R10), LDPE 6% (L6), SBS PG76-22 (PG)].
- 2) SMA 혼합물의 변형강도 분석 - SMA 혼합물의 변형강도와 WT 시험결과와의 상관성 분석을 통하여 SMA 혼합물의 강도 특성 평가방법으로 변형강도의 적용 가능성을 확인하고 상관관계가 양호할 경우 변형강도를 이용한 SMA 배합설계 방법 개발 가능성 확인하였다 [10mm와 13mm 굵은골재 최대치수의 2가지 입도, 바인더 4 종류: AP-5, R10, L4E10, RLDPE5].
- 3) 배수성 혼합물의 변형강도 분석 - 배수성 혼합물의 변형강도와 WT 시험결과와의 상관성 분석을 통하여 배수성 혼합물의 강도 특성 평가방법으로 변형강도의적용 가능성을 확인하고 상관관계가 양호할 경우 변형강도를 이용한 배수성 배합설계 방법 개발 가능성 확인. [10mm와 13mm 굵은골재 최대치수의 2가지 입도, 바인더 4 종류: AP-5, L5E10, LDPE6+Fiber, PQFC]
- 4) OGFC 혼합물의 변형강도 분석 - 미국 배수성 혼합물인 Open-graded friction course (OGFC)의 변형강도와 APA 시험결과와의 상관성 분석을 통하여 OGFC 혼합물의 강도 특성 평가방법으로 변형강도의적용 가능성을 확인. (10mm와 13mm 굵은골재 최대치수의 2가지 입도, 바인더 3 종류: PG64-22, R10, LDPE6)
- 5) 시험포장 포설: 표층용 혼합물을 교차로 구간 차량대기지역 양 방향 2개 차로에 5cm 두께로 길이 50m씩 시험포설을 하고 2년간 연간 2차례 이상씩 현장조사와 코어채취를 수행한다. 적용할 혼합물은 밀입도로서 1, 2차년도 연구에서 소성변형에 약한 바인더는 제외하고 변형에 강해 발생가능성이 낮은 4가지를 무작위로 위치를 선정하여 사

용.

- 6) 1, 2차 년도에 이어 3차 년도에도 시험피트의 2곳에 시험포장을 포설하고 모의주행시험기에 의한 주행을 통한 재료의 공용성과 S_D 의 상관성을 분석.
- 7) 시험포장 지역의 포장 노면 좌우 궤적(wheel path)의 소성변형(rut depth: RD) 상태 분석과 코어채취, 코어에 대한 S_D 의 측정을 통해 공용성(RD)과 S_D 의 상관성을 분석.
- 8) 시험포장이 아닌 일반 도로포장 중에서 포장의 이력을 확인할 수 있는 지역을 선정하여 정상지역과 소성변형 발생지역에서 노면상태를 조사하고 각각 코어를 채취한 후 그 코어로부터 S_D 를 측정하여 소성변형과의 상관성을 분석.

2. 사용재료

가. 아스팔트 바인더

본 연구에서 사용된 기본 아스팔트 바인더는 국내에서 가장 널리 사용되는 침입도 등급 60~80(AP-5) 이다. 아스팔트 개질제로는 수년간의 연구 및 실제 포장에서 많이 사용되어 우수한 성능이 입증된 Low-density polyethylene (LDPE), 재생 LDPE (Recycled LDPE: RLDPE), 재생 HDPE (Recycled high-density polyethylene: RHDPE), 페타이어를 분쇄하여 30번 체를 통과한 고운 고무입자 (Crumb rubber modifier: CRM)를 사용하였다. 또한 Styrene-butadiene-styrene (SBS)로 개질하여 상용화되어 시중에 시판되고 있는 PG76-22 아스팔트 바인더를 사용하였다. 개질제의 분산제로 Ethylene propylene diene monomer (EPDM)를 사용하였다. 혼합물 제조 시에 LDPE 폴리머와 CRM은 건식방법으로 사용되었고 EPDM을 첨가한 아스팔트 바인더는 습식방법으로 제조하여 사용하였다. 그리고 아스팔트가 과다하게 흘러내리는 것을 예방하기 위하여 섬유첨가재인 셀룰로오스 파이버

(Cellulose fiber)를 바인더 첨가 전에 건비빔으로 첨가하였다. 각 개질제의 첨가량에 따른 바인더의 명칭은 다음과 같다.

- AP-5: 아무 개질제도 첨가하지 않은 Pen 60-80 기본 아스팔트 바인더 (Control)
- R10: 전체 바인더 량에 중량비로 10% CRM을 첨가한 개질바인더
- RL5: 전체 바인더 량에 중량비로 5% RLDPE를 첨가한 개질바인더
- L6: 전체 바인더 량에 중량비로 6% LDPE를 첨가한 개질바인더
- L4E10: 전체 바인더 량에 중량비로 4% LDPE를 첨가하고 LDPE량에 중량비로 10% EPDM을 첨가한 개질 바인더
- L5E10: 전체 바인더 량에 중량비로 5% LDPE를 첨가하고 LDPE량에 중량비로 10% EPDM을 첨가한 개질 바인더
- PQFC: RLDPE, RHDPE, CRM을 전체 바인더 량에 중량비로 각 2%, 5%, 5% 첨가한 개질 바인더
- L6F0.3: 전체 바인더 량에 중량비로 6% LDPE를 첨가하고 골재 량에 0.3% 셀룰로오스 화이버를 첨가한 개질 바인더
- PG76-22: SBS로 개질하여 상용화된 PG76-22 바인더

나. 골재

골재의 품질이나 입도는 아스팔트 콘크리트 혼합물의 강도에 중요한 영향을 미친다. 당해 연도 연구에서는 밀입도 혼합물만이 아닌 SMA와 배수성 혼합물에 대한 연구도 함께 진행되었다. 입도가 다른 특수 혼합물에 대해서 적합한 골재가 필요하였다. 밀입도 혼합물에 쓰인 골재는 전국적으로 널리 분포되어 있고 일반적으로 많이 사용되는 화강암과 편마암 쇄석을 굵은골재와 부순 잔골재(Screenings)로 사용하였으며, 채움재(Mineral filler)는 석회석분을 사용하였다. SMA 혼합물과 배수성 혼합물에 대해서는 화강암 단입도 골재를 사용하였고 채움재는 밀입도 혼합물과 같은 석회석분을 사용하였다.

밀입도 혼합물의 굵은골재 최대치수는 표층용 아스팔트 혼합물에 널리 쓰이는 13mm와 19mm 2종류를 사용하였다. 본 연구에 사용된 편마암(Gneiss) 및 화강암(Granite) 골재의 물리적 성질을 해당 KS 시험방법에 따라 시험하여 표 3.1에 나타내었다. 표에서 보여주듯이 화강암 골재는 편마암보다 상대적으로 비중도 크고 흡수율도 낮은 것으로 나타났다. 반면 채움재는 두 골재 모두 같은 석회석분을 사용하였다. 골재 합성입도는 국토해양부 밀입도 규정에 맞도록 입도를 혼합 조정하여 사용하였다. 그림 3.1, 3.2는 시험용 혼합물 제조에 사용된 화강암과 편마암의 입도를 나타낸다.

SMA 혼합물과 배수성 혼합물의 굵은골재 최대치수는 10mm와 13mm 2종류를 사용하였다. 골재의 물리적 특성은 표 3.2에 나타내었다. 그림 3.3, 3.4는 각 SMA 혼합물과 배수성 혼합물의 합성입도를 나타낸다.

표 3.1. 밀입도 혼합물 실험에 사용된 골재의 물리적 성질

시험 항목	시험 규정	편마암			화강암			석회석분 채움재 (Mineral Filler)
		19mm 굵은 골재	13mm 굵은 골재	잔골재 (Screenings)	19mm 굵은 골재	13mm 굵은 골재	잔골재 (Screenings)	
비중	> 2.5	2.62	2.60	2.61	2.72	2.70	2.55	2.75
흡수율 (%)	< 3.0	0.55	0.91	0.79	0.34	1.06	1.58	-
마모율 (%)	< 35	20.13	24.67	-	21.51	33.73	-	-

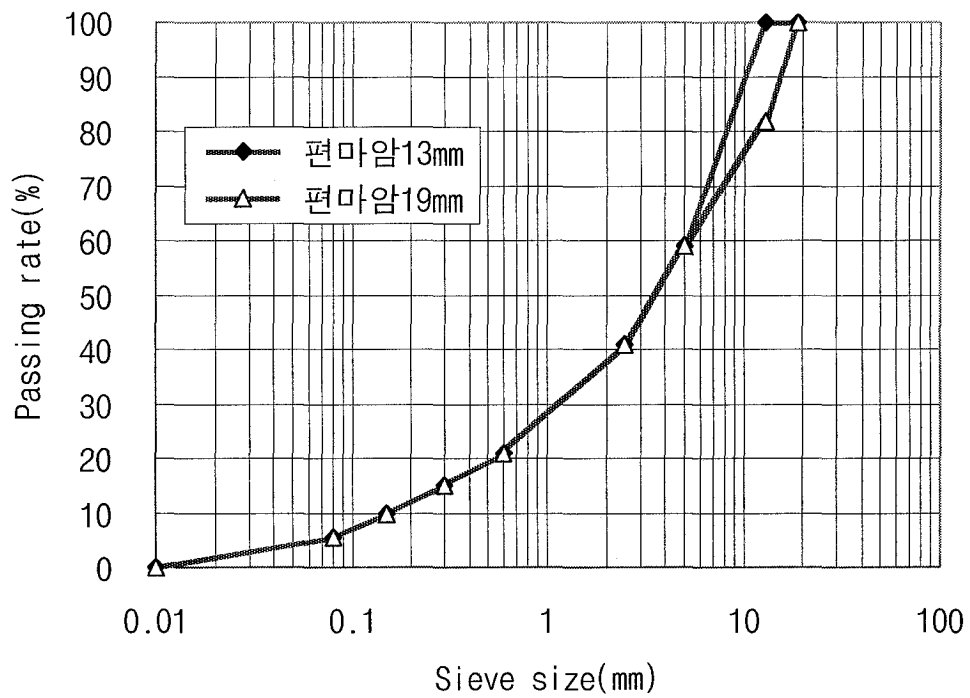


그림 3.1. 밀입도 혼합물 제조에 사용된 편마암 입도

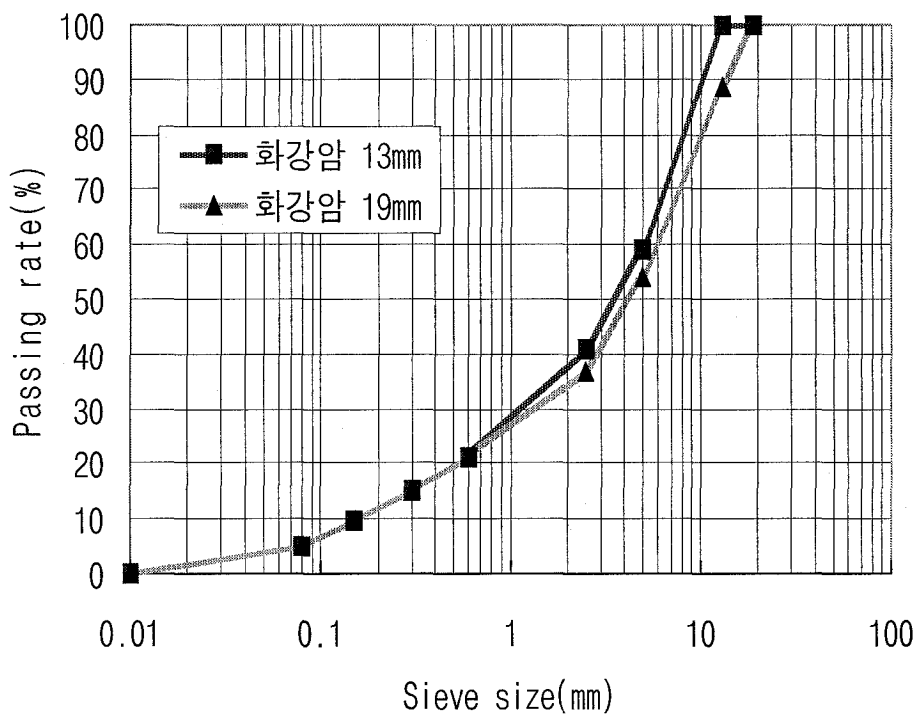


그림 3.2. 밀입도 혼합물 제조에 사용된 화강암 입도

표 3.2. SMA와 배수성 혼합물 실험에 사용된 골재의 물리적 성질

시험 항목	시방 규정	화강암			석회 석분 채움재 (Mineral Filler)
		13mm 굵은골재	10mm 굵은골재	잔골재 (Screenings)	
비중	> 2.5 (2.5)	2.74	2.74	2.78	2.75
흡수율 (%)	< 2.0 (3.0)	0.69	0.96	1.94	-
마모율 (%)	< 30 (35)	15.23	21.56	-	-

* () 배수성 혼합물 골재의 시방규정

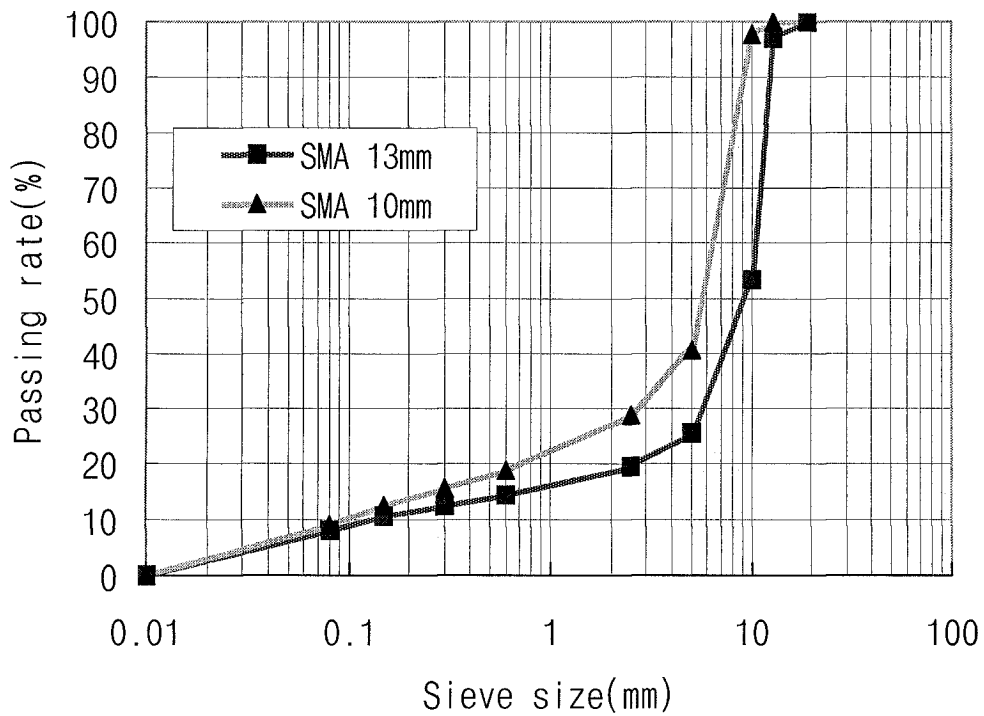


그림 3.3. SMA 혼합물 제조에 사용된 화강암 입도

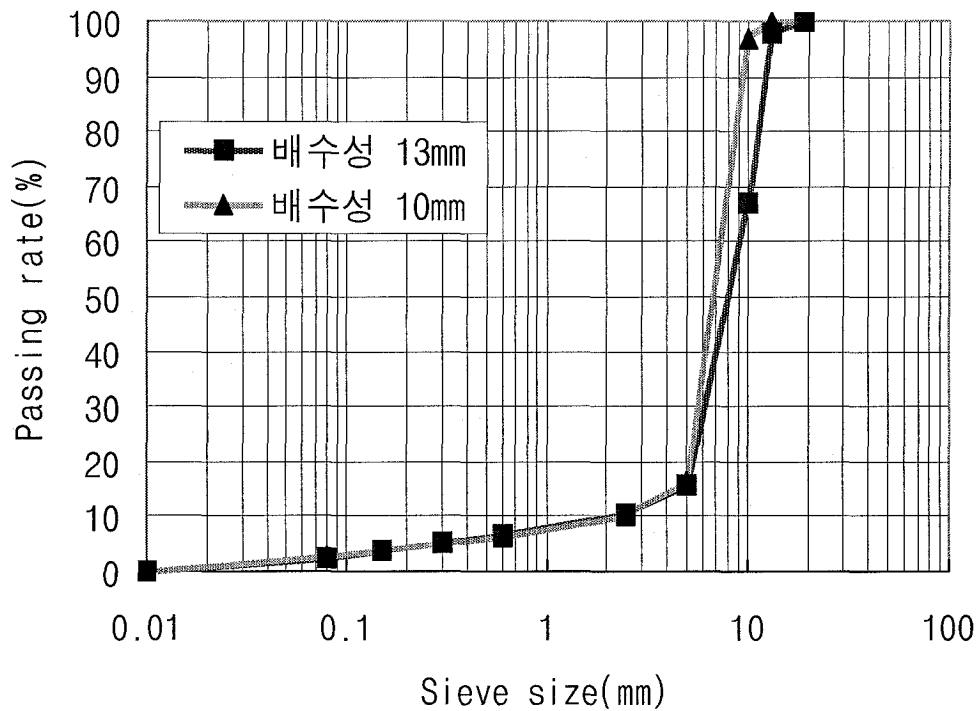


그림 3.4. 배수성 혼합물 제조에 사용된 화강암 입도

SMA 혼합물의 골재 시험 기준은 일반 밀입도 혼합물의 골재 기준과는 다르다. 밀입도 혼합물 보다 더 적은 흡수량과 마모율을 요구한다. 골재의 합성입도는 국토해양부 SMA 입도 규정에 적합하도록 입도를 조정하여 사용하였다. 굵은골재의 맞물림을 통한 골재골격(aggregate skeleton)의 형성을 극대화하여 소성변형을 억제하는 효과를 얻기 위해서는 입도 자체가 혼합물 내의 골재배열을 결정하기 때문에 골재의 입도는 물성만큼 중요하다.

3. 잔유변형강도 비(Retained S_D ratio) 산정 연구.

마살 배합설계에 의한 아스팔트 혼합물은 혼합물의 수분취약성 판정을 위하여 마살 공시체를 60℃ 항온 수조에서 48시간 수침 시킨 후 잔유안정도 시험을 수행한다. 변형강도(S_D) 측정 시험에서도 이와 유사한 방식으로 잔유 변형강도 측정을 통해 혼합물의 수분취약성 판정 가능성 검토하기 위하여 본 연구를 수행하였다. 따라서 본 연구에서는 100mm 원형 공시체를 60℃ 항온 수조에서 24시간 수침과 48시간 수침을 한 후 변형강도를 측정하고 수침 시키지 않은 S_D와 비교하여 시험법의 타당성과 적정 수침시간을 찾기 위한 연구를 수행하였다. 변형강도는 식 (3.1)에 의하여 구했으며 P와 y는 각각 최대하중(N)과 침하깊이(mm)이다.

$$S_D = \frac{0.32P}{(10 + \sqrt{20y - y^2})^2} \text{-----}(3.1)$$

공시체를 제조하여 하루 상온(25℃)에서 보관 후 물 속에 넣고 10분 진공 (380mm Hg) 처리하여 포화시킨 후 60℃의 물에 24시간 또는 48시간 수침 후 꺼내어 바로 변형강도를 측정하여 수침 처리하지 않은 공시체와의 강도비율을 아래 식으로 구한다. 각 혼합물 별로 6개의 공시체를 공극률 4±0.5%로 제조하여 3개는 수침처리, 3개는 상온에서 같은 기간 보관 하다가 변형강도를 측정하여 혼합물별, 수침시간별 잔유강도비 (Retained S_D ratio: RSR)를 (3.2) 식으로 구하여 비교하였다.

$$RSR(\%) = \frac{Wet S_D}{Dry S_D} \times 100 \text{-----}(3.2)$$

여기서, RSR : 잔유변형강도 비(%)
Wet S_D : 수침처리 공시체의 S_D
Dry S_D : 건조상태 공시체의 S_D

각 골재 종류 별, 최대입경과 바인더 종류에 따른 변형강도와 잔유변형강

도 비는 표 3.3과 그림 3.5~3.7에 나타났다. 표와 그림에서 알 수 있듯이 편마암과 화강암의 건조상태 변형강도 값에는 별 차이가 없었으나 화강암의 수침 후 변형강도 값은 편마암보다 현저하게 줄어드는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 24시간 수침보다는 48시간 수침에서 더욱 분명히 나타났다.

표 3.3. 각 혼합물에 대한 24시간 수침과 48시간 후의 잔유변형강도비

Agg.	Agg. Size (mm)	Binder	Dry S_D (MPa)	Wet S_D (MPa)			
				24Hrs	RSR ₂₄ (%)	48Hrs	RSR ₄₈ (%)
Gneiss	13	AP5	3.139	3.462	109.023	2.894	93.553
		L6	3.240	3.644	117.495	3.292	105.731
		R10	2.241	2.550	117.741	—	
		PG	4.185	4.525	107.933	4.913	117.160
		Mean			113.05		105.48
	19	AP5	3.119	3.107	101.230	1.957	63.187
		L6	3.573	3.386	93.854	3.034	83.874
		R10	3.527	2.347	70.735	2.569	75.449
		PG	4.712	4.683	108.129	4.597	102.869
		Mean			93.49		81.34
Granite	13	AP5	3.724	0.695	18.041	0.626	16.181
		L6	3.942	2.011	49.176	2.179	53.171
		R10	—	—		—	
		PG	4.172	2.983	75.390	3.321	80.473
		Mean			47.54		49.94
	19	AP5	3.756	0.929	25.361	1.029	26.330
		L6	3.593	2.198	66.939	1.732	53.578
		R10	—	—		—	
		PG	5.579	4.846	97.555	4.163	85.407
		Mean			63.28		55.10

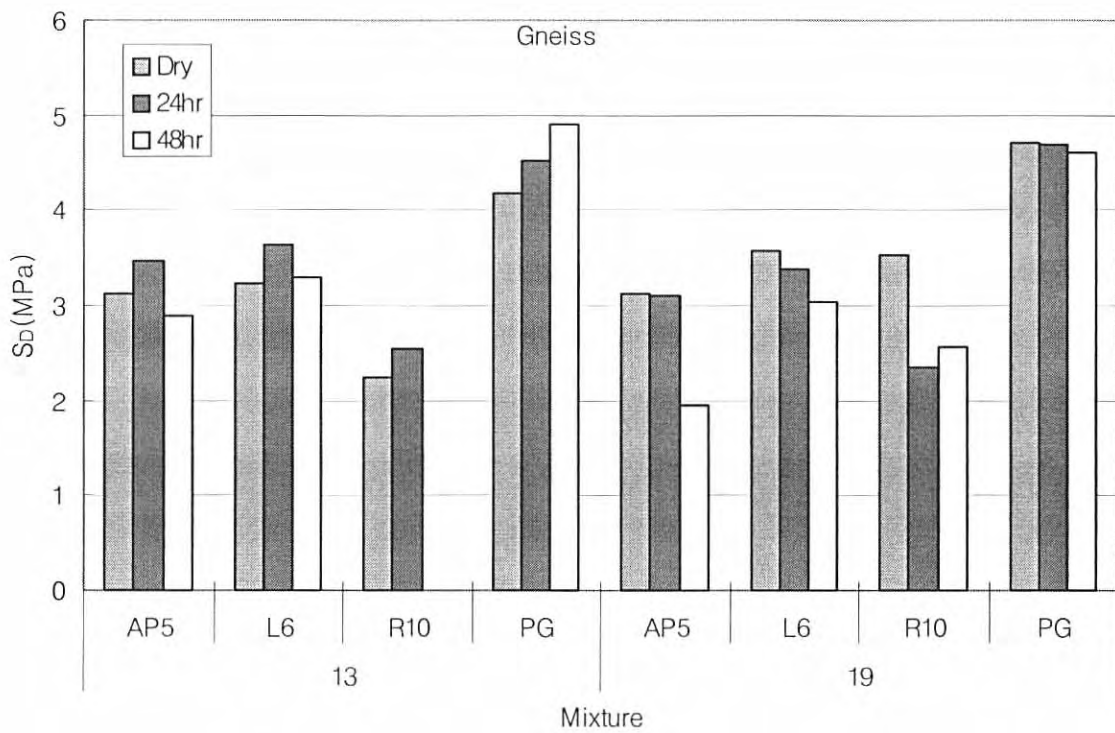


그림 3.5. 편마암 정상(Dry) S_D 와 24, 48 시간 수침처리에 따른 S_D 비교

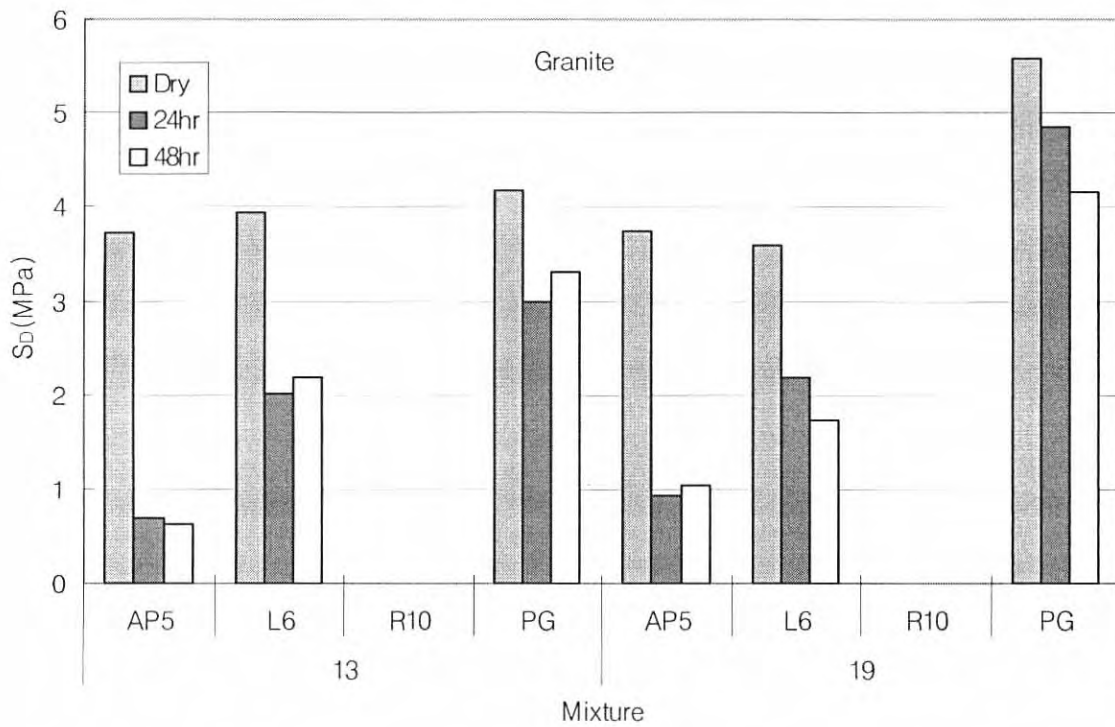


그림 3.6. 화강암 정상(Dry) S_D 와 24, 48 시간 수침처리에 따른 S_D 비교

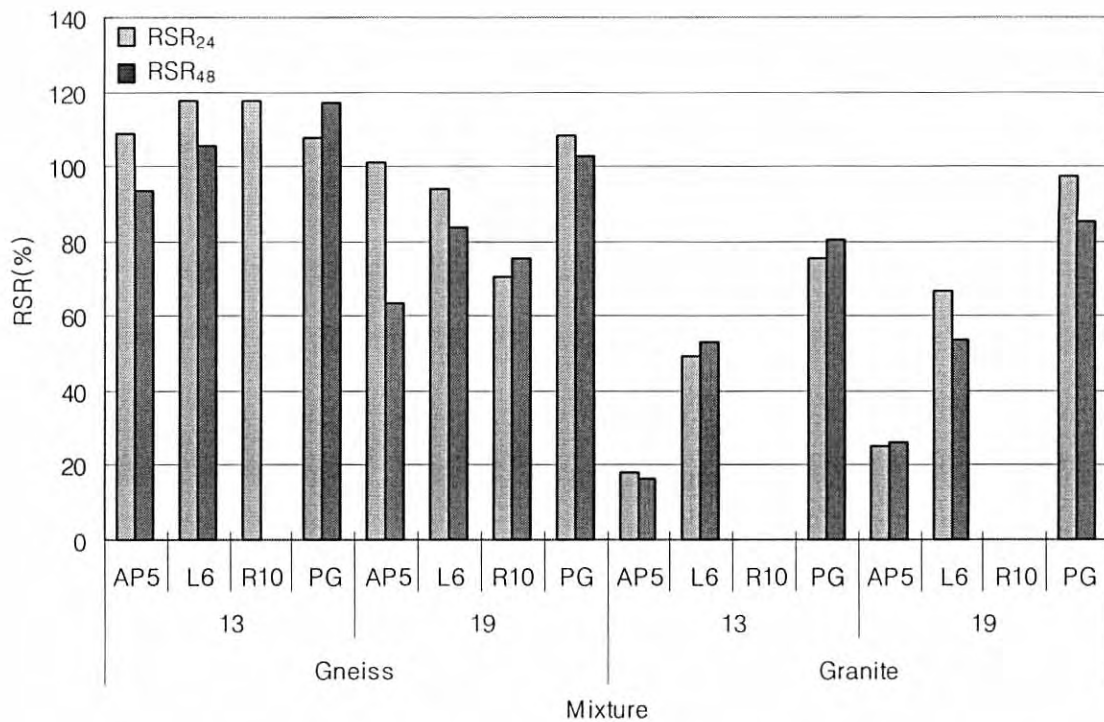


그림 3.7. 수침 시간에 따른 RSR 비교

하지만 표 3.3과 그림 3.5의 편마암 13mm의 경우 24시간 수침에서는 모든 혼합물의 수침 후 변형강도 값이 오히려 증가하여 잔유변형강도 비가 100%를 넘는 결과가 나오는 것을 볼 수 있다. 하지만 48시간의 경우는 일반혼합물 AP5는 다소 낮아지는 것을 알 수 있어, 이러한 결과를 종합하여 볼 때 수분취약성 평가를 위한 잔유강도 비로 보면 24시간 수침보다는 48시간 수침이 필요할 것으로 판단된다. 따라서 이후의 Wheel tracking 시험부터는 60°C에서 48시간 수침 처리하는 한 가지 방법만을 사용하여 건조 상태 시험 결과와 비교하였다.

WT 시험은 30.5cm의 정사각형 슬래브를 제작하여 반으로 잘라 하나는 물성 측정 후에 하루 동안 25°C 항온 챔버에서 건조 상태로 보관 후 시험 6시간 전부터 60°C로 유지되는 WT 챔버에 넣어 두었다가 WT 시험을 하였다. 다른 하나는 물성 측정 후 60°C 물에 48시간 수침 후 꺼내어 바로 60°C로 유지되는 WT 시험기에 세팅후 시험을 수행하였다. 최종 침하깊이(Rut depth: RD)의 비율을 평가하기 위하여 수침 전 공시체와 수침 후 공시체의

침하비율(RD_{dry}/RD_{wet})을 계산하였다. 이 값은 RSR과는 반대로 수침 처리한 혼합물에 대한 수침전 혼합물의 비율이지만 수침으로 물러져 더 깊이 RD가 발생될 것으로 예상되므로 값은 역시 1.0이하로 기대되며 그 비율로 혼합물이 수분에 얼마나 강한지를 알 수 있을 것이다.

표 3.4는 각각 편마암과 화강암의 Wheel tracking (WT) 시험 결과를 나타낸다. 이 시험에서 사용된 바인더는 3가지로 R10은 제외하였는데 그 이유는 앞선 변형강도 시험에서 수침에 따른 수분손상이 너무 커서 제대로 결과를 얻을 수 없었기 때문이다.

표 3.4. 편마암, 화강암 혼합물의 반복주행 시험 결과

Max size	Water Condition	Binder	Gneiss mixture Rut depth (mm)			Granite mixture Rut depth (mm)		
			Dry	48hr wet	RD_{dry}/RD_{wet} Ratio	Dry	48hr wet	RD_{dry}/RD_{wet} Ratio
13mm	Water leaked	AP5	3.61	3.01	1.20	5.12	5.12	1.00
		L6	1.54	2.62	0.59	1.41	1.76	0.80
		PG	2.21	1.57	1.41	0.83	1.41	0.59
		Mean	2.45	2.40	1.06	2.45	2.76	0.80
	Water kept	AP5	3.61	4.83	0.75	3.68	4.02	0.92
		L6	1.32	1.57	0.84	0.41	0.57	0.72
		PG	2.32	2.11	1.10	1.23	1.05	1.17
		Mean	2.42	2.84	0.90	1.77	1.88	0.94
19mm	Water leaked	AP5	4.19	4.42	0.95	5.14	3.85	1.34
		L6	1.94	1.02	1.90	0.77	1.39	0.55
		PG	1.33	1.78	0.75	1.94	1.11	1.75
		Mean	2.49	2.41	1.20	2.62	2.12	1.21
	Water kept	AP5	-	-	-	3.71	2.95	1.26
		L6	1.94	1.45	1.34	1.98	0.59	3.36
		PG	1.42	1.74	0.82	3.78	3.45	1.10
		Mean	1.68	1.60	1.08	3.16	2.33	1.90

표 3.4의 WT 시험의 결과에 의하면 상당수 혼합물의 침하깊이가 예상과 달리 수침 48시간 후 더 적게 나타났다. 즉, 혼합물이 수침으로 손상되면 WT 시험에서 더 깊이 침하되어 RD_{dry}/RD_{wet} 비율이 1 이하가 될 것으로 기대하였으나 많은 경우 그 반대현상이 나타났다. 이것이 실험 에러일 가능성

이 있으므로 몇 번의 반복 시험에서도 유사한 결과를 얻었다. 특히 S_D 시험에서 수침 후 S_D 가 매우 낮아 수분손상이 심각한 것으로 판정되었던 화강암 혼합물에서 오히려 수침전후의 침입깊이 비율이 1.0 이상으로 더 높게 나타난 현상을 표에서 볼 수 있다. 예를 들어 48시간 수침 후와 무처리 S_D 시험에서 RSR이 약 16%와 26%로 매우 취약하던 AP5 13, 19mm 화강암의 경우 RD_{dry}/RD_{wet} 비율이 1.0, 1.34 (Water leaked 상태)와 0.92, 1.26 (water kept 상태)로 0.92를 빼고는 모두 Dry 상태가 더 깊이 침하된 것으로 나타났다. 또한 0.92도 RSR 시험의 비율과 비교한다면 수분 취약성을 전혀 반영하는 것이라 보기 힘들다.

이에 대한 원인 분석에서 WT 시험도중에 공시체에서 물이 빠져나가 (Water leaked) 표면부터 마르면서 시험조건이 바뀌는 것을 주목하고 이것을 한 원인으로 추정하고 이에 대한 조치를 취하였다. 즉, 수침 후 공시체가 물을 그대로 보유한 상태(Water kept)로 시험 될 수 있도록 몰드 내에 비닐을 깔아 물이 새어나가지 않도록 조치 후 시험을 수행하였다. 하지만 여전히 건조 상태에서의 공시체보다 48시간 수침 후 침하깊이가 더 낮게 나타나는 결과를 얻었다. 이를 48시간의 수침에 의해 혼합물의 양생이 진전되는 현상으로 추정할 수 있으나, 혼합물은 손으로 눌러보거나 육안으로 보면 매우 무른 느낌이 현저함에도 침하가 오히려 낮게 나타나는 것을 볼 수 있었다.

이런 점으로 보아 수분 취약성 판정 관련 시험 방법으로 본 연구에서 사용된 WT 시험은 부적합한 것으로 보인다. 따라서 박리 등에 의한 취약성을 판정하기 위해서는 인장 유발 시험 메커니즘인 간접인장강도 시험이 사용되는 것이라 판단된다. 하지만 본 연구에서 사용된 100psi 이하중 압력보다 훨씬 더 높은 압력을 사용하는 WT 시험으로는 어떠한 결과가 얻어질 것인지에 대해서는 향후 별도의 연구가 있어야 할 것으로 보인다. 이 결과는 표 3.4, 그림 3.8, 3.9에서 보여준다.

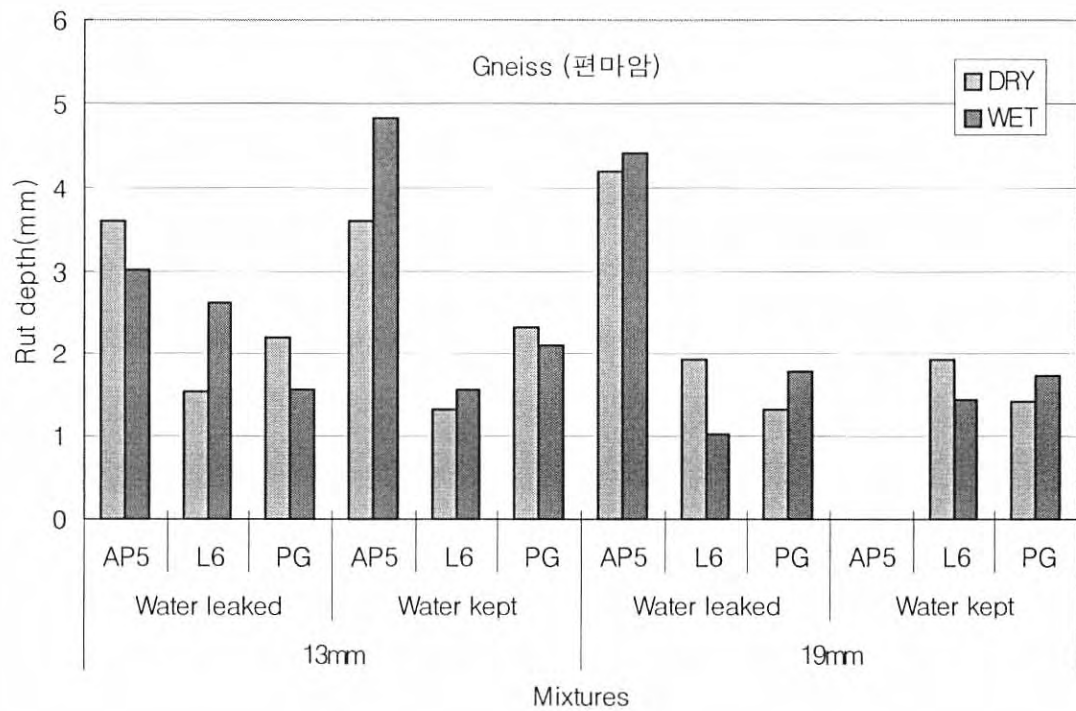


그림 3.8. 편마암 혼합물의 48시간 수침 전후의 WT rut depth 비교

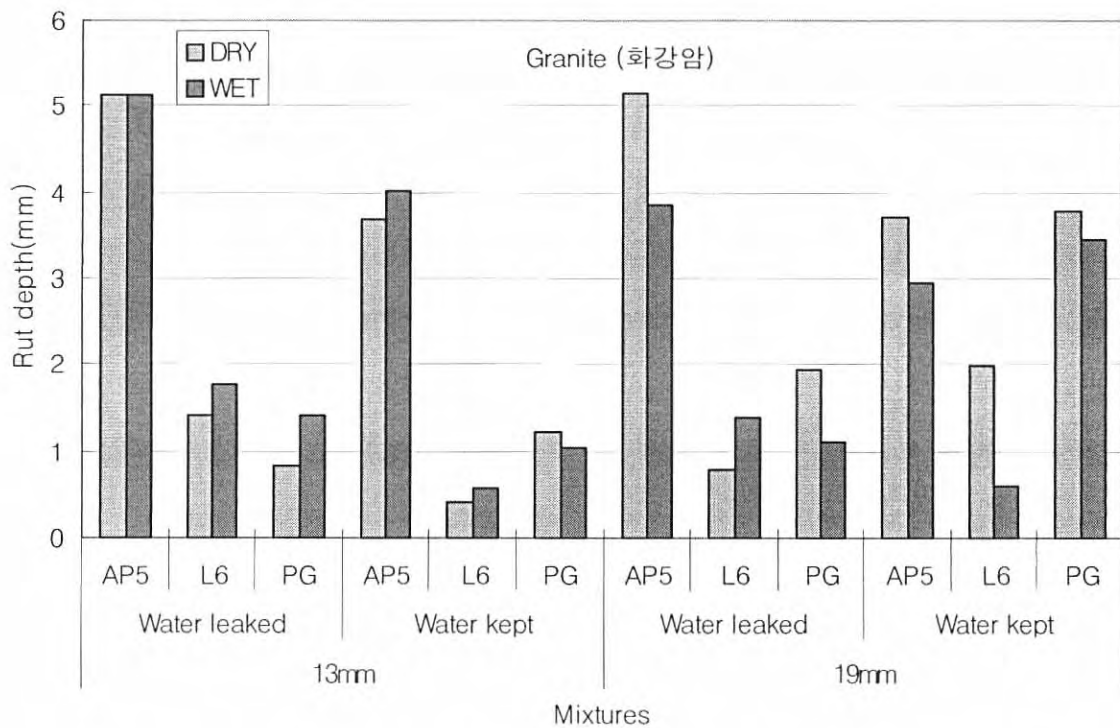


그림 3.9. 화강암 혼합물의 48시간 수침 전후의 WT rut depth 비교

그림 3.10, 3.11, 3.12는 변형강도와 WT 시험결과의 적부여부를 판정하기 위해 x축에 건조 상태 시험 값, y축에 수침후 처리 값을 넣고 45° 대각선을 사용해서 점들의 분포를 나타낸 것이다. 일반적으로 혼합물이 수침으로 취약해지면 변형강도도 낮아지므로 대각선의 아래쪽에 점들이 나타나야 한다. 그림 3.10의 SD를 보면 두 점 만이 대각선 위에 있고 취약해진 혼합물의 점들이 대부분 대각선 아래에 있어 수침 후 변형강도가 대부분 낮아졌음을 보여준다. 따라서 변형강도 시험은 수침으로 취약해진 혼합물의 특성을 비교적 잘 반영하는 시험법임을 알 수 있다.

반면에 Wheel tracking (WT) 시험에서는 혼합물이 수침으로 취약해지면 WT 시험결과에 반영되어 건조 상태보다 침하깊이(RD)가 깊어지면서 점들이 대각선의 위쪽에 나타나야 한다. 하지만 편마암(그림 3.11), 화강암(그림 3.12) 모두 약 반에 해당하는 5, 6점 들이 대각선 하단에 나타나 취약해진 혼합물들의 RD가 더 적음을 보여준다. 이는 WT 시험으로 수분취약성을 판정하는 데는 무리가 있음을 보여주는 결과라 할 수 있다. 특히 그림 3.11의 경우 화강암 혼합물은 S_D 시험에서 48시간 수침처리 후 50%이하로 강도가 낮아지는 것으로 나타났고 강도가 증가되는 경우는 전혀 없었는데 여기서는 반 정도가 오히려 좋게 나타나 이를 증명하고 있다 (타원 내의 점들).

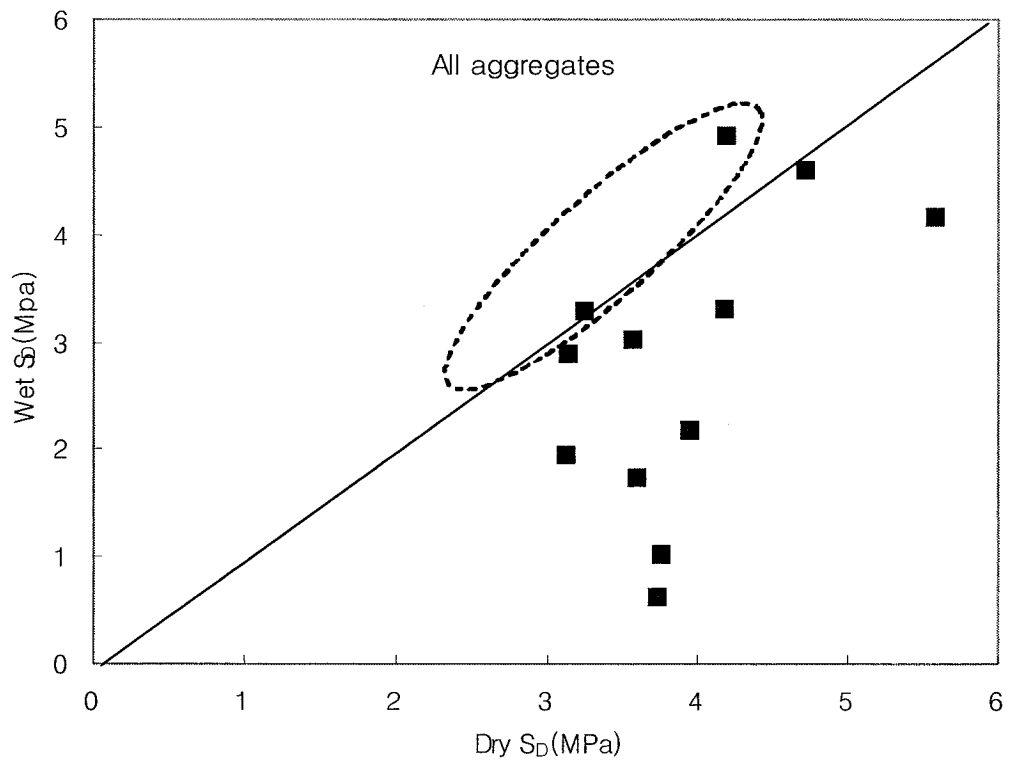


그림 3.10. 48시간 수침 전 후의 변형강도의 치의 분포

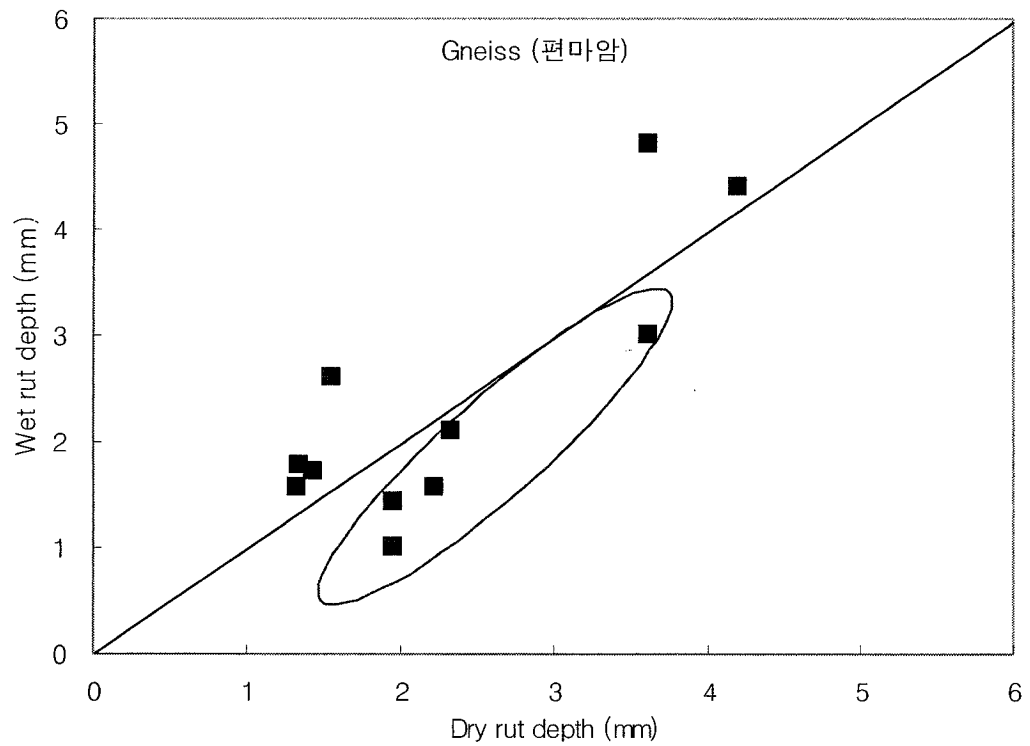


그림 3.11. 48시간 수침 전 후의 WT rut depth치의 분포(편마암)

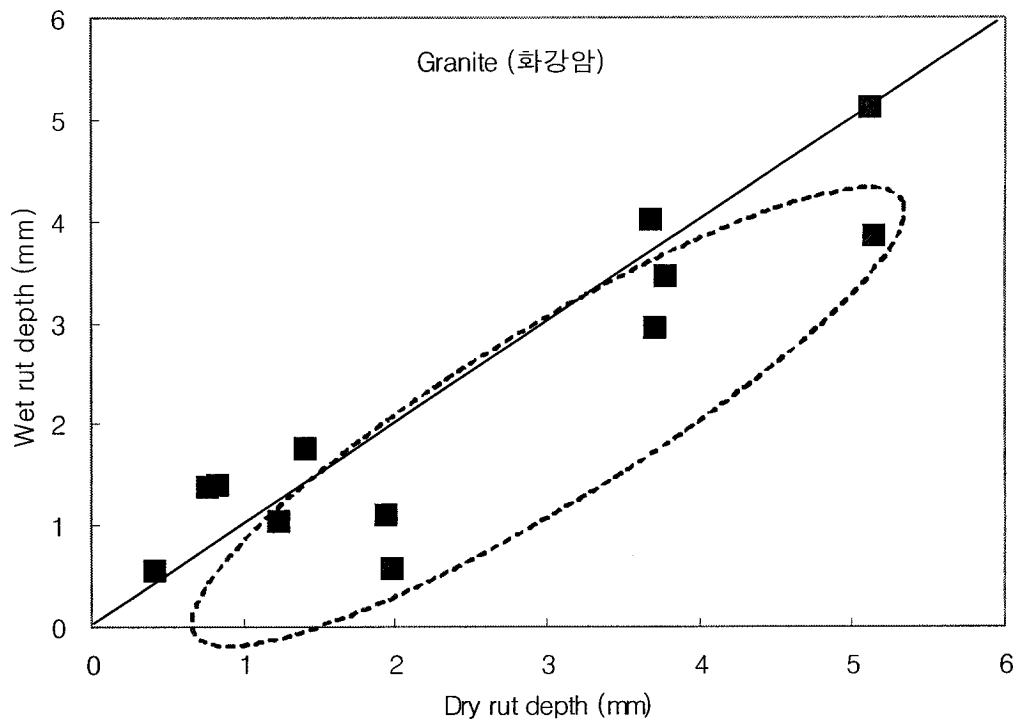


그림 3.12. 48시간 수침 전 후의 WT rut depth치의 분포(화강암)

이제까지 결과를 종합해 보면 편마암은 변형강도 유지비가 48시간 후에 13, 19mm 모두 양호한 80% 이상이었으나 화강암은 48시간은 물론 24시간에도 매우 낮은 40-60%대이며 특히 무개질 AP5는 20% 전후이었다. 이를 통해 잔류 변형강도비로 아스팔트 혼합물의 수분취약성을 파악할 수 있음을 확인할 수 있었다. 그리고 수분에 매우 취약한 화강암은 24시간 수침만으로도 충분함을 알 수 있으나 편마암을 고려하면 24시간 만에는 오히려 RSR이 오히려 증가하는 경우도 있으므로 48시간 수침처리가 보다 적합하다고 판단된다. 그리고 그보다 더 긴 시간의 처리도 가능하지만 효율 면에서 현재까지의 결과에 의하면 48시간으로 어느 정도 충분하며 그 이상은 고려하지 않았다.

하지만 48시간 수침처리 후 변형강도 시험에서 나타난 아스팔트 혼합물의 수분취약성을 WT의 결과로 입증할 수 없었다. 따라서 향후 별도의 검증 과정에 대한 연구를 통해 이를 증명하기 위한 노력이 필요하며 그 이전에는

변형강도에 의한 수분취약성 시험의 실제 적용은 보류해야할 것으로 판단된다. 즉, 향후 보다 강한 WT 윤하중의 적용이나 간접인장강도에 의한 수분취약성 평가와 병행하여 변형강도 유지비의 합격 적합비율 선정 연구가 필요할 것으로 판단된다.

4. SMA(Stone Mastic Asphalt) 혼합물의 분석

당해 연도 연구에서는 특수 혼합물에 변형강도의 적용 가능성 분석 연구를 포함하고 있다. 본 시험은 SMA 혼합물의 변형강도 측정과 WT (Wheel Tracking) 시험의 수행, 두 결과의 상관성 분석 등을 통해 SMA 혼합물의 강도특성 평가방법으로 변형강도의 적용가능성을 확인하고 상관관계가 양호할 경우 변형강도를 이용한 SMA 배합설계 방법 개발 가능성을 확인하기 위하여 수행되었다.

가. 배합설계

국내에서는 일반적인 밀입도 혼합물의 배합설계에 마샬 방법을 적용한다. 일반적으로 SMA 혼합물 공시체는 마샬 다짐기(Mashall compactor)로 제조하지만 안정도와 흐름치는 적용하지 않는다. 표 3.5는 SMA 혼합물의 배합설계 기준을 나타낸다.

표 3.5. SMA 혼합물의 배합설계 기준

항목		기준				
		19mm	13mm	10mm	8mm	5mm
아스팔트 함량 (%)		5.8이상	6.2이상	6.6이상	7.0이상	7.6이상
공극률 (%)		2.0~4.0				
골재 간극률 (VMA)	공극률 2~3미만	16이상	17이상	18이상	19이상	20이상
	공극률 3~4미만	17이상	18이상	19이상	20이상	21이상
포화도 (VFA: %)		75이상				
드레인 다운 시험 값 (%)		0.3이하				
동적안정도 (회/mm)		2000이상				

배합설계는 아스팔트 함량을 5.5%, 6.0%, 6.5%, 7.0%, 7.5% 까지 5단계로 변화시켜 가며 공시체를 제조하였다. 본 연구에서는 공극률 2~4%의 기준을 적용하였으며 13mm와 10mm 혼합물의 골재 간극률은 각각 17과 18이상을 목표로 배합설계를 수행하였다. 드레인 다운 시험은 SMA 혼합물을 혼합한 뒤 종이가 깔려 있는 팬에 1kg을 고르게 펴 170±2℃로 유지되는 오븐에 1시간 동안 넣어둔다.

1시간 뒤 오븐에서 혼합물을 꺼내어 팬에서 혼합물을 비운 후 종이의 무게를 측정한다. 이때 팬에 있는 종이의 무게는 사전에 측정되어있어야 하며 모든 혼합물에 대하여 동일한 크기의 종지와 팬을 사용하여야한다. 또한 종지는 1시간 동안 170℃ 오븐에서 넣어 두면 수준 증발로 무게가 감소되므로 혼합물을 제외한 종지만을 오븐에 넣어 미리 종지의 무게 감량을 측정해 두었다가 혼합물 중량변화에 이를 적용해야 한다.

드레인 다운 시험 값은 종지에 남은 혼합물의 손실된 무게를 혼합물에 대한 비율로 산정한 값이다. 식 (3.3)는 드레인 다운 시험 값의 계산식이다.

$$DD(\%) = \frac{W_L}{W_O} \times 100 \quad \text{-----} \quad (3.3)$$

여기서, DD = drain down (%) 값,

W_L = 손실 혼합물의 무게 (g),

W_O = 혼합물의 초기 무게 (g)이다.

배합설계는 총 8가지 혼합물에 대하여 수행하였다. 1가지 골재(화강암)와 2종의 굵은 골재 최대치수(13mm, 10mm), 그리고 4종의 바인더(AP-5, R10, RL5, LAE10)를 조합하였다. 표 3.6은 사용된 혼합물의 구분과 설명이며 표 3.7은 그 결과이다.

본 연구에서의 공시체 제조는 마샬 다짐기가 아닌 선회다짐기(Superpave gyratory compactor: SGC)를 사용하였다. 마샬 다짐은 해머를 일정한 높이에

서 자유낙하 시켜 혼합물을 다지는 충격다짐이다. 이는 아스팔트 포설 현장에서 롤러를 사용하여 다지는 것과는 다르다. 따라서 변형강도 시험에서는 가능한 현장다짐에 가깝게 모사하기 위하여 선회다짐기를 사용하여 공시체를 제조한다.

보통 밀입도 혼합물은 100mm 공시체를 제작하여 변형강도 시험을 수행한다. 하지만 SMA 혼합물과 같은 갭입도의 경우 바인더의 점성과 치밀한 혼합물 덩어리에 의해 강도를 발현하는 밀입도에 비하여 공시체 자체의 측면 구속력이 상대적으로 약하다는 가정 하에 150mm 공시체를 사용하였다. 그림 3.13과 3.14는 선회다짐기의 본체 부분과 공시체 제조 메커니즘을 보여준다. OAC (Optimum Asphalt Content)는 각 혼합물 별로 SMA 혼합물의 기준을 만족하는 구간에서 결정하였다.

표 3.6. 혼합물 명칭

Agg.	Max. size	Designation	Description
Granite	10mm	AP	Granite 10mm SMA grade, AP-5
		R10	Granite 10mm SMA grade, Rubber 10%
		RL5	Granite 10mm SMA grade, RLDPE 5%
		L4E10	Granite 10mm SMA grade, LDPE4%+EPDM10%(for LDPE)
	13mm	AP	Granite 13mm SMA grade, AP-5
		R10	Granite 13mm SMA grade, Rubber 10%
		RL5	Granite 13mm SMA grade, RLDPE 5%
		L4E10	Granite 13mm SMA grade, LDPE4%+EPDM10%(for LDPE)

표 3.7. 배합설계 결과

Mixture		OAC (%)	Air Void (%)	VMA (%)	VFA (%)	Drain down Loss (%)
Agg	Binder					
10mm	AP5	6.7	2.42	18.00	86.54	0.12
	R10	6.4	2.93	17.92	83.67	0.10
	RL5	6.7	2.72	18.38	85.22	0.13
	L4E10	6.5	2.90	17.74	84.31	0.13
13mm	AP5	6.3	2.64	17.28	84.72	0.17
	R10	6.4	2.39	17.33	86.23	0.08
	RL5	6.6	2.46	17.91	86.25	0.12
	L4E10	6.4	2.66	17.57	84.85	0.11

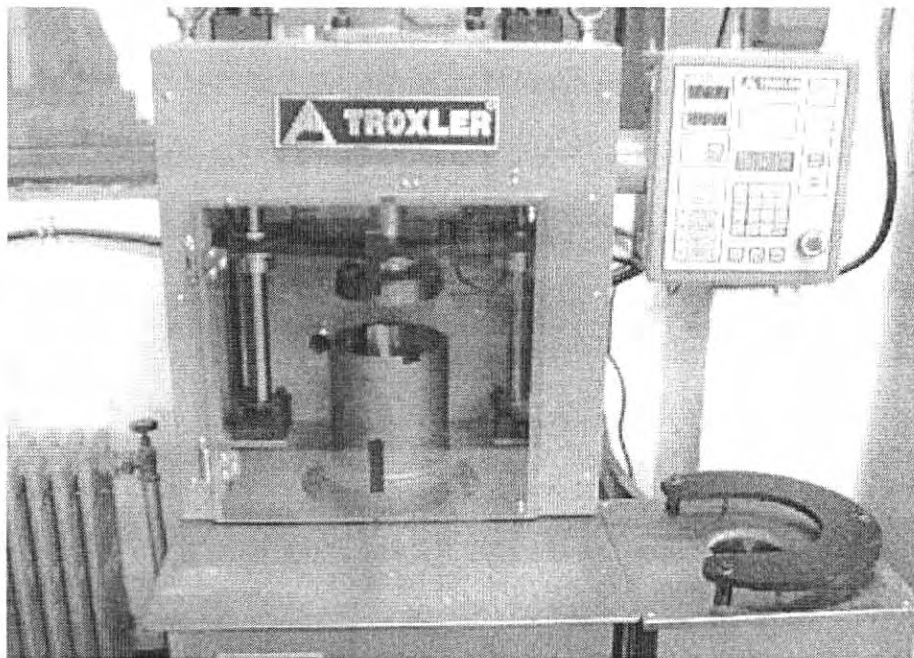


그림 3.13. 선회다짐기

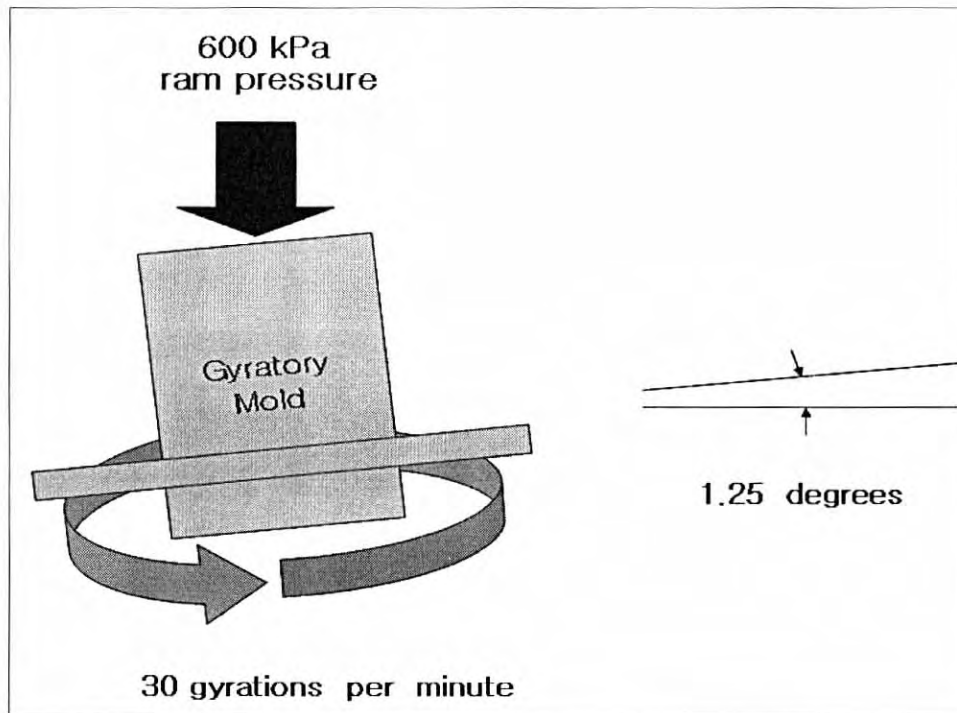


그림 3.14. 선회다짐기의 다짐 메커니즘

제조된 공시체는 1일 양생 후 물성을 측량을 하고 다시 1일 뒤 60℃로 유지되는 항온 수조에 30분간 수침 뒤 30mm/min의 속도로 하중을 재하 하여 강도 시험을 하였다. 강도 시험의 피크(Peak) 점에서 하중과 변위를 기록하고 상기 식 (3.1)에 의해 변형강도를 계산하였다.

나. 반복주행 (Wheel Tracking: WT) 시험

반복주행 시험은 아스팔트 혼합물의 소성변형 저항성을 평가하는데 가장 보편적으로 사용되는 시험방법이라 할 수 있다. 반복주행 시험은 동적 재하 시험으로 슬래브 공시체가 시험에 사용된다. 본 연구에서는 2~4%의 목표 공극률의 배합설계를 거쳐 결정된 최적 아스팔트 함량으로 혼합물을 제조하여 단기 노화(혼합물을 비빈 후 160℃ 오븐에 1 시간 보관)를 거친 후 Roller press compactor (그림 3.15)를 사용하여 30.5cm × 30.5cm × 6.2cm의 슬래브 공시체를 제작하였다.

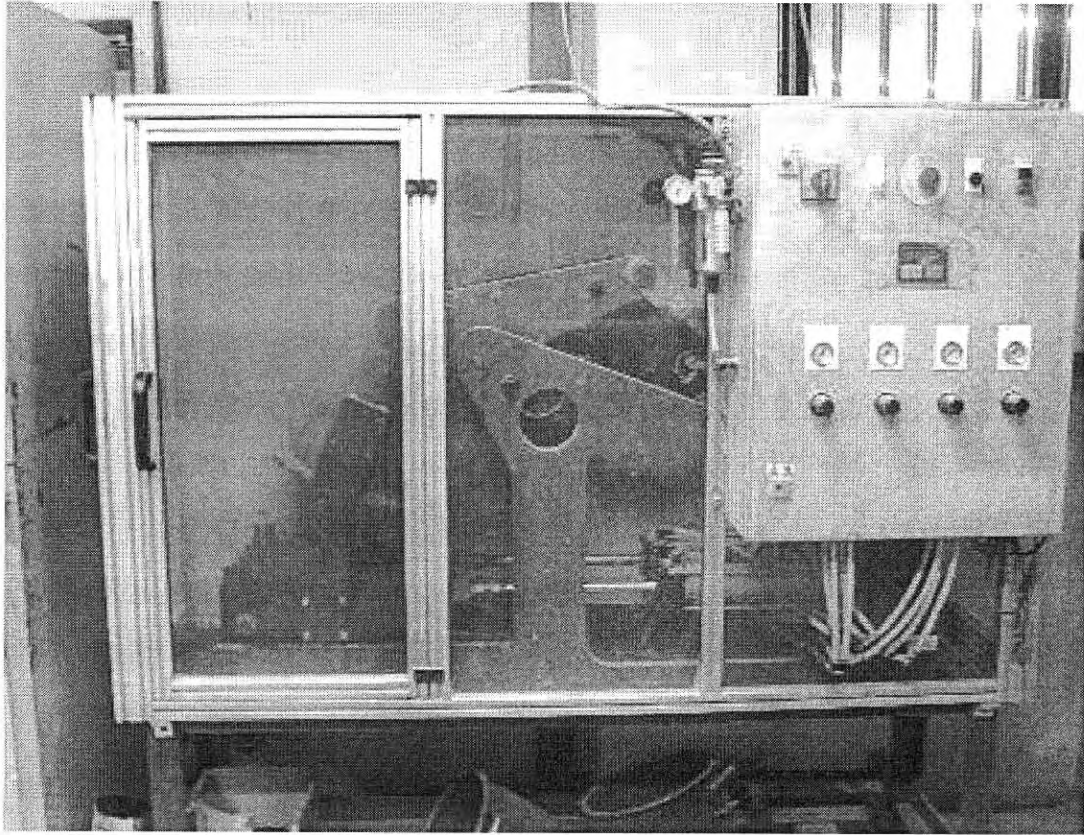


그림 3.15. 슬래브 공시체 다짐기

제작된 슬래브 공시체는 12시간이상 실내에서 식힌 후 물성시험을 거쳐 공극을 확인 후 목표 공극률 이내로 만들어진 슬래브 공시체는 24시간 양생 (25°C 챔버에 보관)을 거쳐 시험에 사용하였다. 슬래브 공시체는 크기가 크고 무거우며 바닥이 넓어 양생 및 운반 시에도 항상 같은 바닥 크기의 20mm 두께 나무판자 위에 얹어 놓고 다루었다. 일단 양생 후 그림 3.16과 같이 130mm와 170mm로 잘라 폭이 작은 130mm 슬래브공시체는 WT 시험에 사용하고 큰 쪽인 170mm 슬래브에서는 S_D 시험을 위하여 3개의 100mm 코어를 채취하였다. 채취된 3개의 코어 공시체는 24시간 25°C에서 양생 후 60°C에 30분 수침 후 물기를 닦고 신속히 변형강도 시험에 사용되었다.

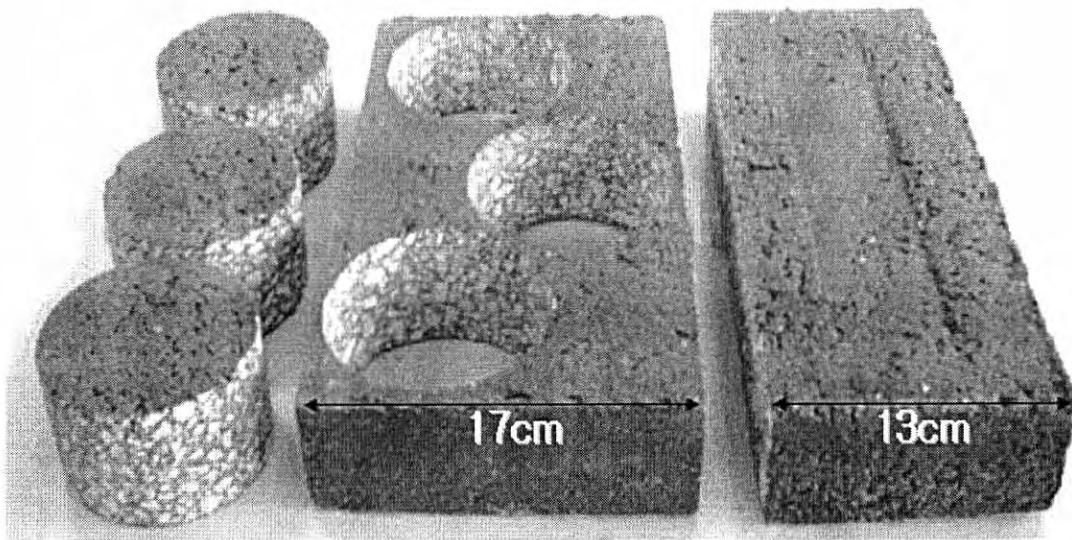


그림 3.16. 슬래브 공시체를 반복주행 시험을 위해 자른 후 변형강도 시험을 위해 3개의 코어를 채취한 모습

반복주행 시험은 공시체를 시험온도 60℃에서 6시간 이상 보관 시킨 후 반복주행 시험기로 시험을 수행 하였다. 시험기는 바퀴를 통해 접지압 100psi (700kPa)를 야기하는 윤하중 압력 하에 왕복 40cycle/min의 속도로 90분간 총 3,600cycle (7,200pass)을 가한다. 반복주행 중 침하량 측정은 LVDT (Linear variable differential transformer)를 이용하였으며 데이터 수집 빈도는 3Hz로 주행에 따른 침하 깊이를 측정 하였다.

바퀴의 재질은 강재이고 직경 200mm, 폭 50mm이며 1회 왕복거리(Stroke)는 200mm이고 강재와 아스팔트 콘크리트의 직접 접촉에 의한 골재의 파손 등을 방지하기 위하여 부직포를 슬래브 공시체 표면에 덮었다. 그림 3.17은 본 연구에 사용된 반복 주행 시험기에 공시체를 넣고 부직포를 깔고 세팅한 후 바닥판이 움직이며 바퀴를 굴리는 모습이다.

아스팔트 혼합물의 반복주행 시험에서는 세로(y)축을 침하깊이(Depth: D), 가로 (x)축을 반복회수(cycle)로 하는 D-cycle곡선이 얻어지며 한국과 일본에서는 이 곡선으로부터 동적안정도(DS)를 계산하여 혼합물을 판정하는 근거로 활용한다. 동적 안정도는 혼합물이 1mm 침하 하는데 필요한 통과횟수로 나타내며 이를 같은 구간 내에서 pass/mm로 나타낸다. 최종 침하 깊이

는 실험 종료 즉, 3600 cycle 왕복 주행 후의 침하 깊이 이고, 동적 안정도는 문제가 있다고 지적되어온 한국 산업규격 (KS)의 동적 안정도(KS F 2374, 2000)와 함께 개선된 새로운 산출 방법으로 계산된 동적 안정도를 분석에 사용하고 이를 비교하였다.

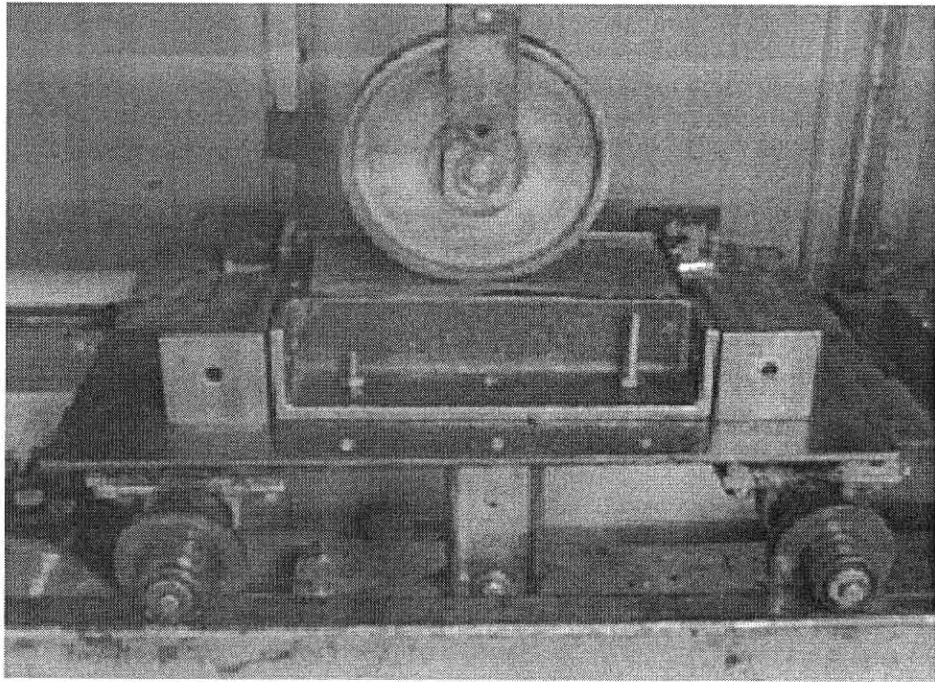


그림 3.17. 반복주행 시험기

기존의 동적안정도 (DS) 계산은 주행 말기의 data만을 이용하므로 전체적으로 침하가 깊어도 말기에 침하 진전도가 낮으면 DS가 크게 되어 우수한 혼합물로 판정되는 모순이 있다. 아스팔트 혼합물은 특성상 초기에 많은 침하가 일어나며 시간이 지나면서 경화가 진행되어 추가 침하 속도가 완만해지는 것이 일반적인 현상이다. 따라서 초기 침하가 심하게 일어나는 것은 공용성을 크게 저하시키며 근본적으로 혼합물에 문제가 있는 것이다. 하지만 기존의 동적안정도 산정 방법은 초기 공용성 불량 혼합물이 오히려 좋은 것으로 간주되는 문제가 있다. 식(3.4)는 KS 동적 안정도 산출 방법을 보여주며 그림 3.18은 이를 도식적으로 나타내었다.

$$DS \text{ (pass/mm)} = 42 \times \frac{15}{d_{60} - d_{45}} \text{----- (3.4)}$$

여기서 DS : 동적안정도(pass/mm)
d60 : 60분에서의 침하량(mm)
d45 : 45분에서의 침하량(mm)

이 식은 분당 21cycle(42pass)의 속도로 60분간 수행하는 그림 3.9와 같은 휠 트래킹 시험 방법에서의 결과를 대입하여 구할 수 있다. 하지만 본 연구에서는 분당 40cycle(80pass)로 90분 시험을 수행하였으므로 이 식을 수정하여 $DS = 80 \times 22.5 / (d_{7200} - d_{5400})$ 을 사용하였다. 여기서 22.5는 휠 트래킹 시간이 60분에서 1.5배인 90분으로 증가됨으로 식(3.4)의 15의 분자 15에 1.5배를 해 준 것이고 d_{7200} 과 d_{5400} 은 각각 최종 침하 깊이인 7200pass (90분)과 5400pass의(67.5분)에서의 침하 깊이를 나타낸다.

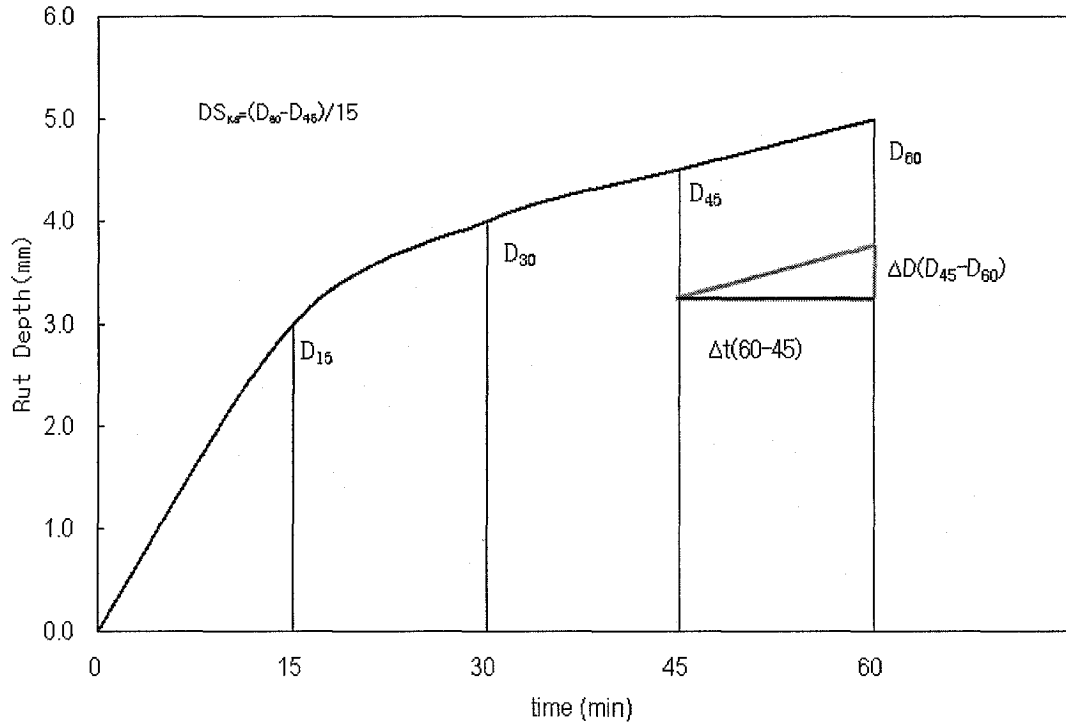


그림 3.18. 한국 산업 규격(KS)에 의한 동적안정도

KS 방법과 비교를 위해 본 연구에서는 그림 19에서와 같이 초기점인 500cycle, 중앙점인 1,800cycle 및 종점인 3,600cycle의 기울기의 역수(m_i)를 취해서 더한 값을 사용하는 최근에 개발된 방법(김광우 등, 2006)을 이용하였다. 이는 동적안정도로 초기와 중기, 말기의 기울기를 누적 고려하기 위한 취지에서 섰정한 것이다. 기존 방법에서의 최종단계의 동적안정도만 취하는 모순을 초기와 중기의 기울기 역수와 같이 고려함으로써 초기의 기울기가 큰 경우 조기 공용성 저하 문제를 야기하므로 이를 계산에 포함하게 한 것이다. 즉, 전체 곡선에서 중요한 3점인 초기의 기울기, 대표성을 나타내는 가운데까지의 기울기, 그리고 최종 침하깊이에 의한 기울기의 역수를 누적해서 구하는 것이다 그림 3.19와 식(3.5)는 본 연구에서 사용된 동적안정도의 산출 방법을 보여 준다.

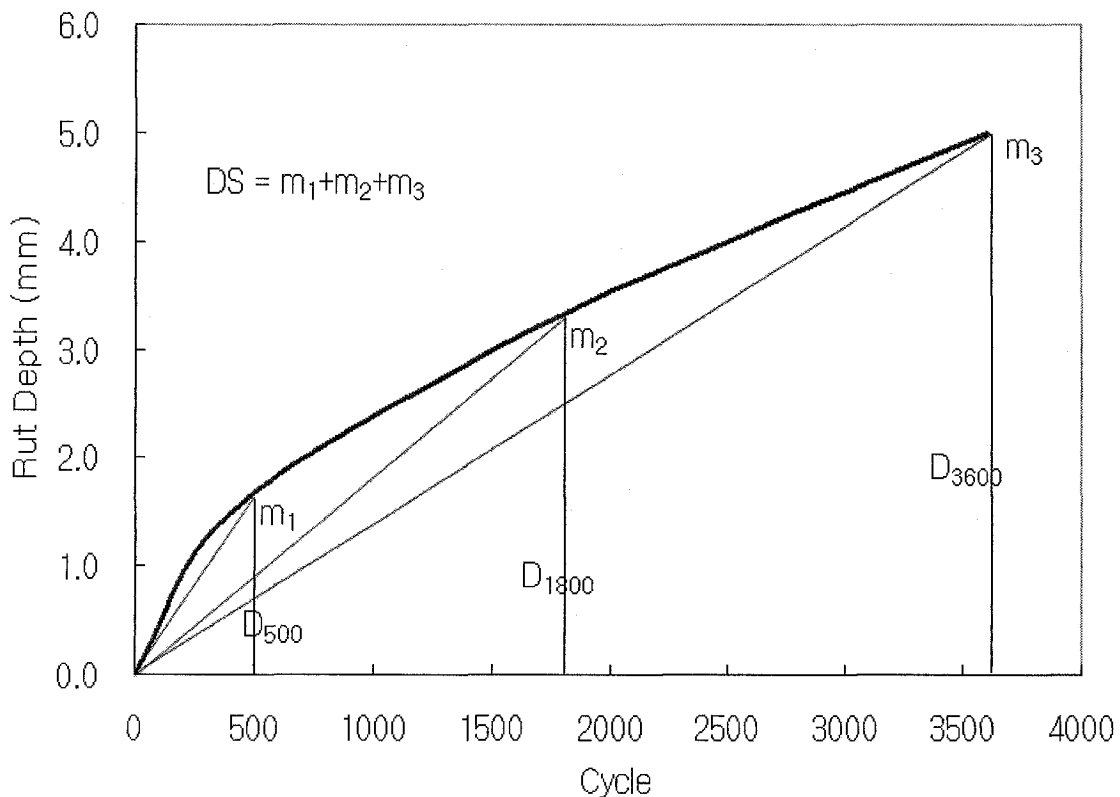


그림 3.19. 새로이 제시된 동적안정도(DS_{new})의 개념도 (김광우 등 2006)

$$DS_{new} = 2(m_1 + m_2 + m_3)$$

$$= 2 \left[\frac{500}{D_{500}} + \frac{1,800}{D_{1,800}} + \frac{3,600}{D_{3,600}} \right] \text{-----} (3)$$

D_{500} = 500 cycle 에서의 침하깊이 (mm)

D_{1800} = 1,800 cycle 에서의 침하깊이 (mm)

D_{3600} = 최종 cycle 에서의 침하깊이 (mm)

표 3.8은 슬래브 공시체의 공극과 반복주행 시험의 결과인 동적안정도와 최종 침하깊이를 나타내며 그림 3.20과 그림 3.21은 각각 10mm와 13mm 혼합물의 반복 주행에 따른 침하 깊이 추이를 보여준다.

표 3.8. 반복주행 시험의 결과

Mixture		Air Void (%)	Dynamic stability (pass/mm)		Rut depth (mm)
Agg	Binder		KS	New	
10mm	AP5	3.05	3500	2572	5.08
	R10	2.71	3818	2633	4.91
	RL5	2.19	5478	4012	3.20
	L4E10	2.20	2520	3499	4.02
13mm	AP5	2.90	3600	2956	4.53
	R10	2.79	3213	3519	3.81
	RL5	2.49	7875	5590	2.26
	L4E10	2.60	2571	3529	3.97

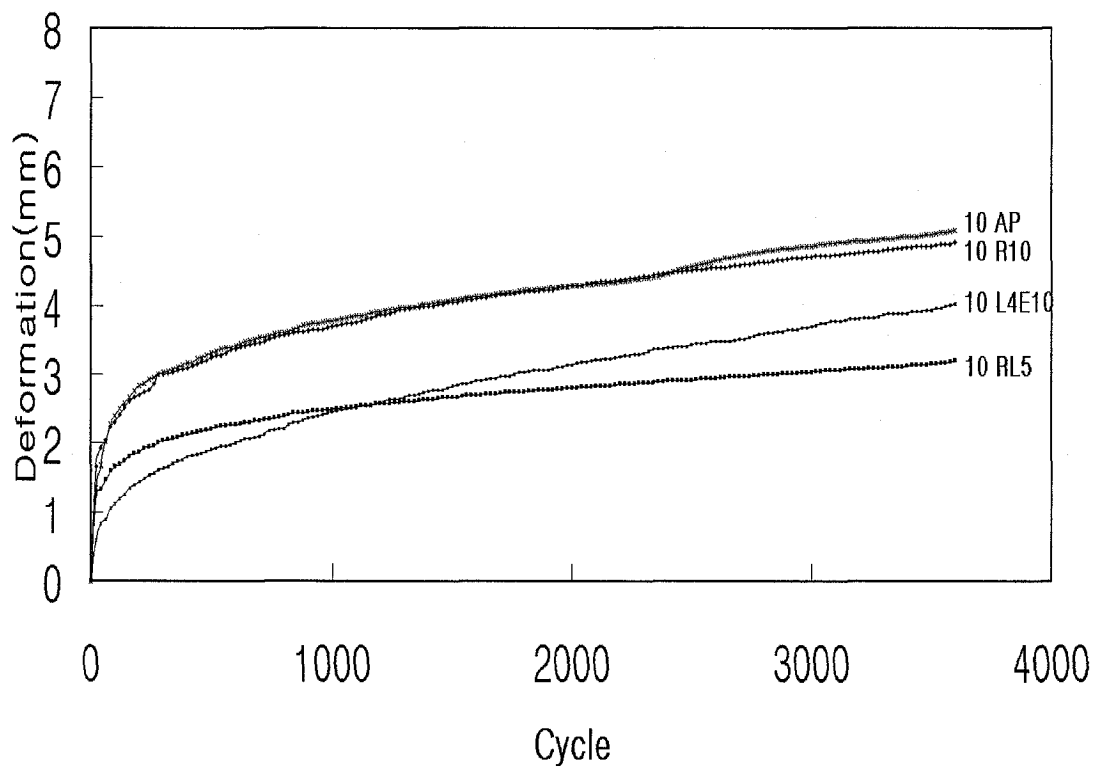


그림 3.20. 10mm SMA 혼합물의 WT 그래프

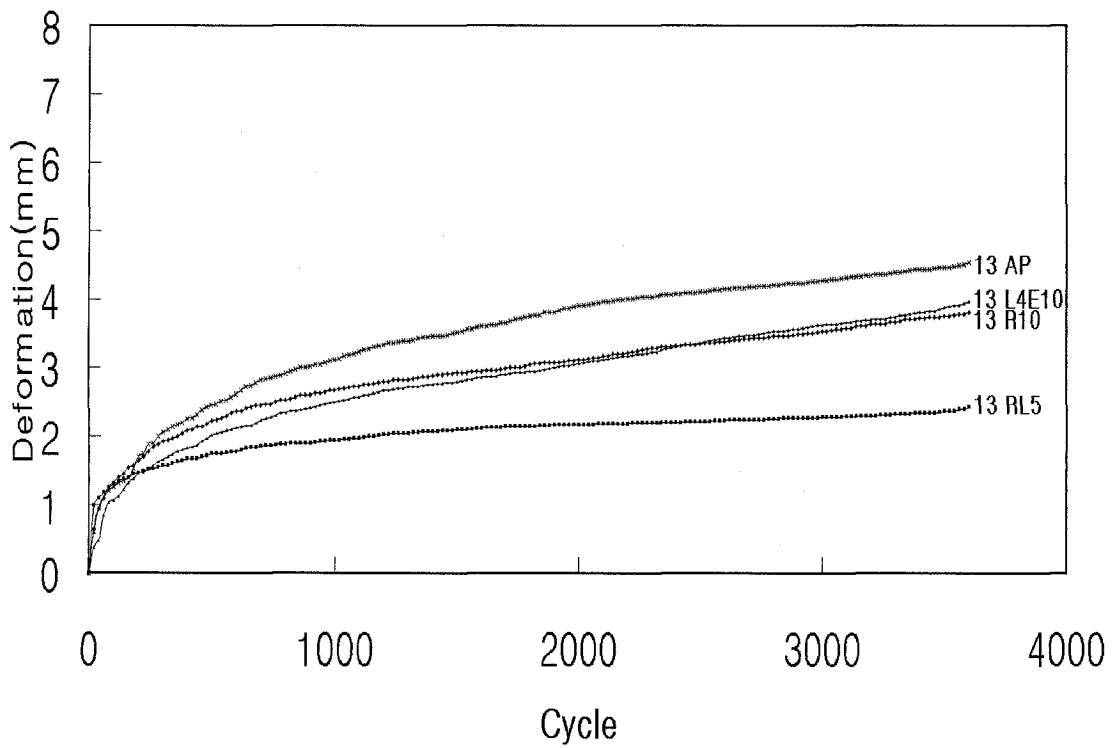


그림 3.21. 13mm SMA 혼합물의 WT 그래프

최종 침하 깊이를 보면 일반아스팔트(AP)로 제조한 SMA 혼합물의 경우 5mm 전후의 값이 나와 본 시험기로 측정되는 양호한 밀입도 혼합물의 수준인 5-7mm과 비슷하거나 약간 더 나은 것으로 보인다. 하지만 실제 도로에서는 일반 AP5를 사용한 SMA가 AP5 밀입도 혼합물보다 소성변형에 훨씬 강하므로 이를 고려한다면 최종침하깊이가 2-3mm 이하 수준은 되어야 할 것으로 보이나 그렇지 못하다.

한편 나머지 3 가지 개질 바인더로 제조한 SMA도 AP-5 SMA 보다는 다소 덜 침하되었지만 이 역시 개질 아스팔트를 사용한 밀입도 혼합물보다 그리 좋은 수준이라고 할 수 없다. 왜냐하면 같은 바인더를 사용한 밀입도 개질 아스팔트 혼합물들에 대해 본 WT 장비로 시험한 최종침하 깊이도 2-3mm 수준이므로 SMA가 더 나은 점은 나타나지 않은 것이라 할 수 있다.

따라서 실제 도로에서 SMA 혼합물 포장의 소성변형에 매우 강한 점을 염두에 두고 볼 때 본 연구에서 수행된 wheel tracking 시험결과는 SMA의 장점을 그리 잘 나타내지 못하는 것으로 판단된다. 이는 본 연구자 뿐 만 아니라 타 연구기관에서도 유사한 결과가 얻어진 것으로 SMA의 특성 판정에 어려움이 있음을 보여주는 것이다.

골재 크기와 바인더별로는 10mm와 13mm 모두 RL5 혼합물이 침하가 적었고 AP-5 바인더는 가장 많은 침하가 발생하였다. 그림 3.22는 10mm와 13mm의 KS식으로 산출된 동적 안정도와 새로운 방법으로 산출된 동적 안정도의 비교를 나타낸다.

그림 3.22의 그래프를 살펴보면 대체적으로 KS의 동적 안정도가 높게 계산되었다. 하지만 13mm R10과 L4E10의 혼합물의 경우 KS 동적 안정도 보다 새로운 방법으로 계산한 동적 안정도가 더 높은 값을 보였다. 그림 3.21에서 보듯이 L4E10과 R10 혼합물은 AP 혼합물 보다 초기 침하가 적고 최종침하 깊이도 낮다. 따라서 WT 시험의 그림 3.21로 보나 최종침하깊이로 보나 이 두 혼합물이 AP 보다는 우수한 재료임에도 KS방법으로는 AP의 동적안정도보다 더 낮게 평가되는 모순이 있다.

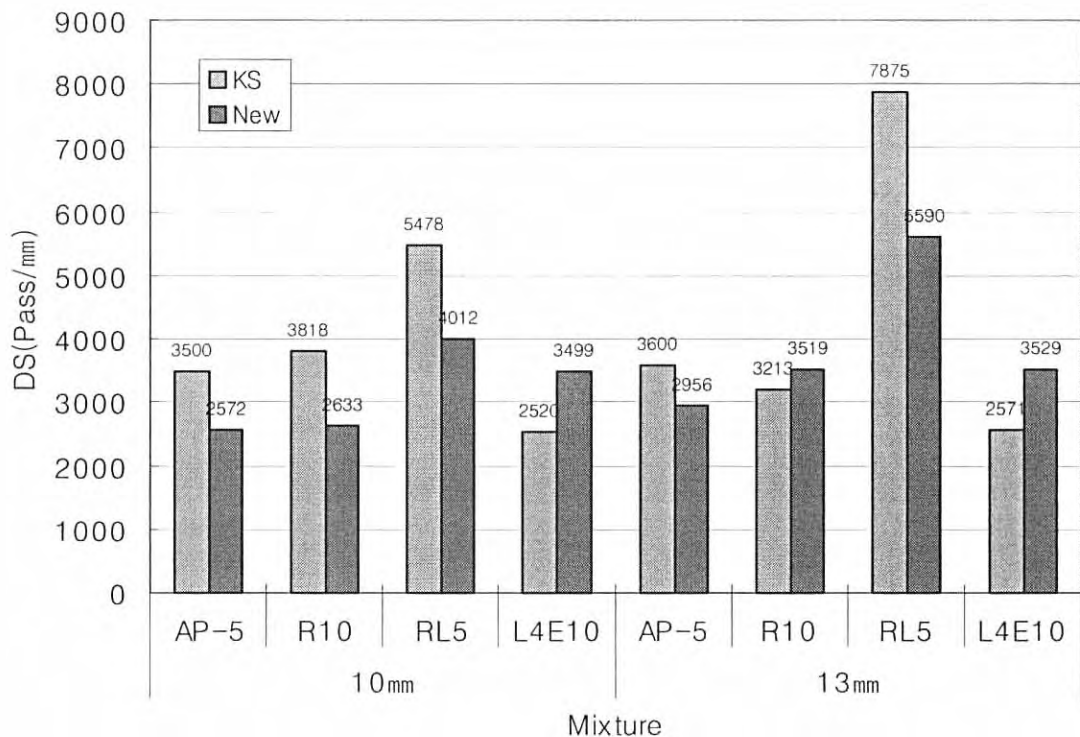


그림 3.22. SMA 혼합물의 동적 안정도 비교

즉, KS 방법으로는 10mm의 AP 최종 침하깊이가 L4E10보다 훨씬 크나 DS는 AP의 3500보다 작은 2520이다. 반면 새로운 DS_{new} 는 AP와 L4E10이 각각 2572와 3499로 이점이 개선되었음을 보여준다. 즉 KS의 동적안정도 산출 방법에서는 초기 침하를 고려하지 않고 후반부 곡선의 기울기에만 의존하는 점이 이와 같은 결과를 나타내는 주원인임을 보여주는 한 예이다.

다. Kim-test

30.5cm×30.5cm 크기의 슬래브 공시체를 170mm와 130mm로 잘라 130mm의 슬래브로 반복주행 시험을 수행하였다. 170mm의 슬래브 공시체는 변형강도 시험을 하기 위해 다시 3개의 직경 100mm 코어를 채취하였다. 표 3.9는 각 혼합물 별로 채취한 코어의 변형강도 측정 결과를 나타낸다.

표 3.9. 100mm 코어 공시체의 변형강도

Mixture		Air Void (%)	P(N)	y(mm)	S _D (MPa)
Agg	Binder				
10mm	AP5	2.68	1872	5.39	1.684
	R10	2.71	2252	5.70	2.004
	RL5	2.19	2479	4.81	2.316
	L4E10	2.20	2290	5.00	2.105
13mm	AP5	2.90	930	5.85	0.815
	R10	2.79	1829	5.25	1.654
	RL5	2.22	2164	4.50	2.061
	L4E10	2.60	2552	6.35	2.225

그림 3.23은 코어 공시체의 변형강도를 혼합물 별로 비교하여 나타낸 것이다. 밀입도 표층 혼합물의 포설을 위한 변형강도 기준은 선회다짐 75회 다짐인 경우 3.2MPa이고 100회 다짐인 경우 4.25 MPa 이다(아스팔트..., 2008). 하지만 표 3.9에서 보듯이 전체적으로 SMA 혼합물은 모두 밀입도 혼합물의 기준을 훨씬 못 미치는 낮은 변형강도 값을 나타낸다. 따라서 변형강도를 사용한 SMA 혼합물의 평가는 매우 낮은 값이 나와 밀입도와 비교시 균형 있는 평가가 되지 못한 것으로 판단된다. 이는 WT 시험에서 SMA가 제대로 평가되지 못하는 점과 유사한 경향이므로 향후 보다 깊은 연구를 통해 SMA를 평가하는 방법의 개발이 필요해 보인다.

비록 절대 값 수준으로 SMA의 변형강도는 큰 의미가 없지만 바인더 별로 보면 AP5의 S_D가 가장 낮은 것으로 나타났으며 RL5와 L4E10의 혼합물

은 반복주행 시험 결과와 마찬가지로 변형강도가 더 우수하다. 굵은골재 최대치수를 비교해 볼 때 일반 밀입도의 경우 골재 사이즈가 클수록 강도가 높게 나오는 것과 반대로 13mm 혼합물의 변형강도가 상대적으로 낮게 나온 것을 알 수 있다. 이는 SMA의 굵은골재 최대치수가 클 경우 다짐에 의해 골재골격을 이루는 수직방향 이외의 방향으로 한 골재가 밀릴 경우 사방을 밀입도 처럼 matrix(잔골재+filler+바인더)가 구속해 주지 못하므로 골격에 Buckling이 일어나기 때문으로 추정된다.

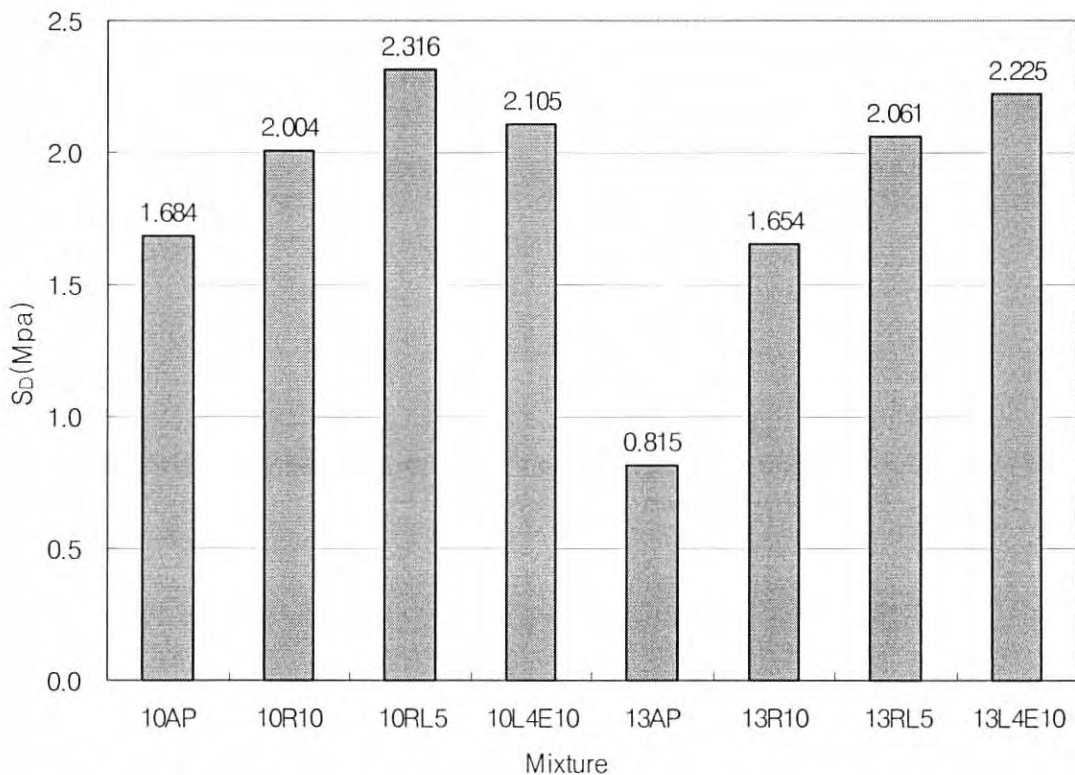


그림 3.23. 100mm 코어 공시체의 변형강도 비교

앞서 언급하였듯이 본 연구에서 수행한 변형강도 시험은 두 종류이다. 상기의 코어를 채취하여 얻은 변형강도와 별개로 150mm의 공시체를 선회다짐기로 제작하여 변형강도 시험을 수행하였다. 표 3.10은 150mm 선회다짐 공시체의 변형강도 결과를 나타낸다.

표 3.10. 선회다짐 공시체의 변형강도(150mm)

Mixture		Air Void (%)	P(N)	y(mm)	S _D (MPa)
Agg	Binder				
10mm	AP5	3.95	1273	4.5	1.816
	R10	2.96	2461	5.0	2.263
	RL5	3.65	2683	4.7	2.518
	L4E10	3.18	2941	4.9	2.559
13mm	AP5	2.26	2519	4.6	1.880
	R10	3.74	2469	3.9	2.308
	RL5	3.64	2705	4.5	2.501
	L4E10	4.05	2336	5.1	2.133

그림 3.24는 150mm 선회다짐공시체의 변형강도를 혼합물 별로 비교하여 나타낸 것이다. 전체적으로 변형강도가 코어 공시체 보다는 높게 나왔으나 150mm 공시체임에도 역시 밀입도 혼합물의 100mm 공시체 일반도로용 기준인 3.2MPa은 물론 150mm 공시체의 3.5MPa 기준에는 훨씬 못 미치는 낮은 값이다. 하지만 바인더별로 보면 무개질 바인더인 AP가 가장 낮고 개질바인더가 높아 비록 그 절대값은 낮지만 상대비교를 통해 SMA 혼합물도 개질바인더의 사용이 소성변형 저항성을 더 크게 해줄 수 있었다.

표 3.10에서 알 수 있듯이 150mm 선회다짐공시체의 공극은 슬래브 공시체의 공극과 비교하면 다소 높게 나온 것을 알 수 있다. 이는 같은 혼합물이더라도 선회다짐기와 슬래브다짐기와의 다짐력의 차이가 원인이라고 여겨진다. 그로인해 선회다짐공시체의 변형강도와 코어공시체의 변형강도는 서로 상관성이 높지 않을 것으로 판단된다.

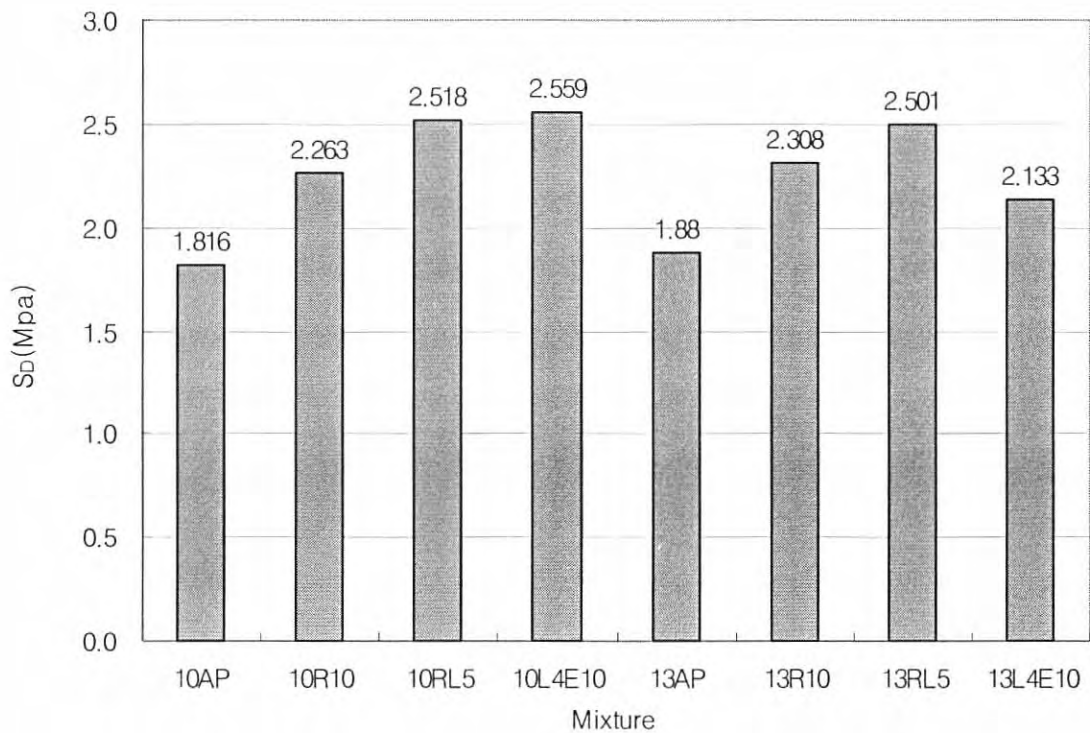


그림 3.24. 선회다짐 공시체의 변형강도 비교(150mm)

라. 상관성 분석

비록 SMA 혼합물에 대한 변형강도가 매우 낮게 나와 적용성이 떨어짐을 알 수 있지만 SMA의 변형강도시험 결과가 WT 시험결과와 어느 정도의 상관성을 가지는지를 판단하기 위하여 두 시험결과를 가지고 회귀분석을 수행하였다. 참고적으로 기 수행된 연구의 밀입도 혼합물에 대한 두 시험결과와의 상관성분석에서는 R^2 이 0.9 이상 얻어졌다.

그림 3.25와 그림 3.26은 각 각 10mm와 13mm SMA 혼합물의 최종침하깊이와 슬래브 코어공시체 변형강도와의 회귀분석 결과를 보여준다. 먼저 비록 S_D 의 수준이 상당히 낮기는 하지만 10mm 혼합물의 경우 침하깊이와 변형강도가 어느 정도 양호한 상관관계($R^2 = 0.82$)가 있는 것으로 나타났다. 하지만 13mm의 경우에는 상대적으로 매우 낮은 상관관계($R^2 = 0.37$)를 보였다.

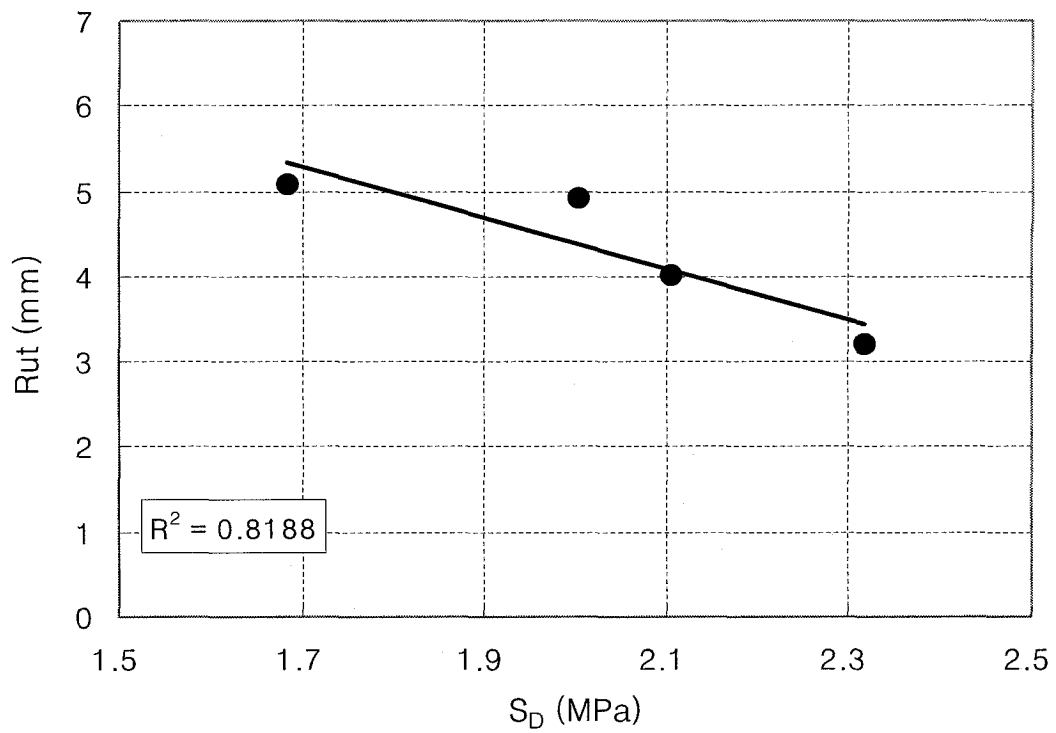


그림 3.25. WT 침하깊이와 코어 공시체의 상관성 분석(10mm)

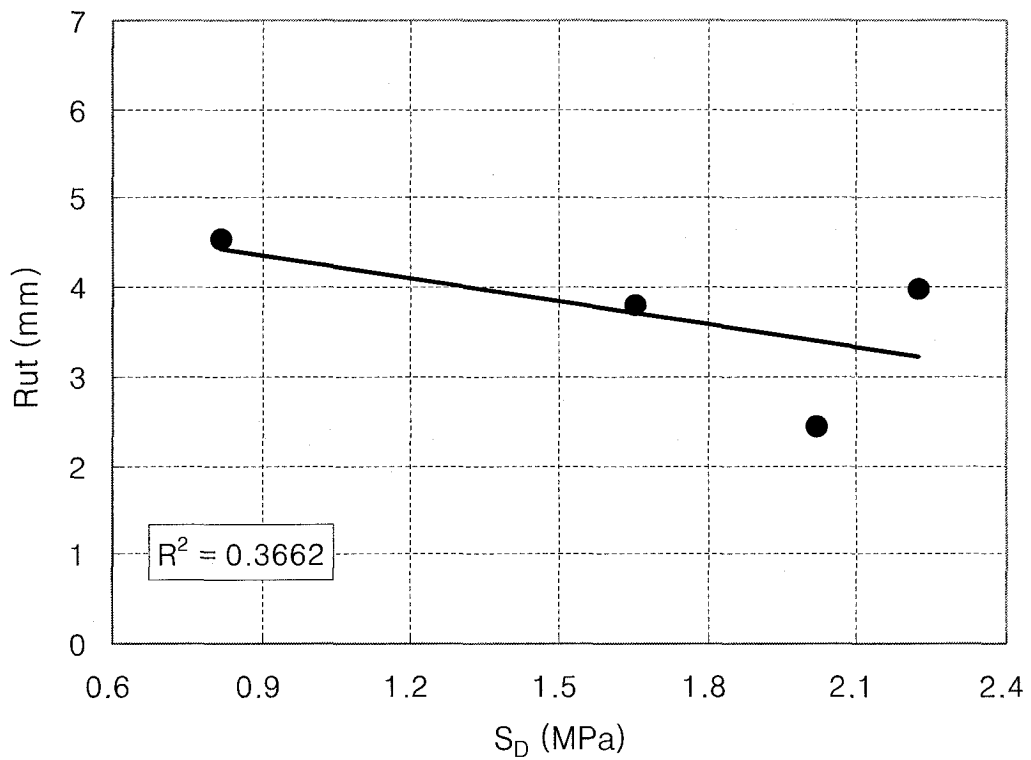


그림 3.26. WT 침하깊이와 코어 공시체의 상관성 분석(13mm)

그림 3.27은 그림 3.25와 그림 3.26을 종합한 그래프로 10mm SMA 혼합물과 13mm SMA 혼합물의 100mm 코어 공시체 변형강도 전부를 WT 침하깊이와 상관성 분석을 한 것이다. 그래프에서 알 수 있듯이 전체적으로 시험 결과의 R^2 값이 현저히 낮은 것으로 나타났다.

그림 3.28은 10mm SMA 혼합물과 13mm SMA 혼합물의 150mm 선회다짐 공시체의 변형강도 값과 WT 침하깊이와의 상관성을 분석한 것이다. 그림에서 보듯이 변형강도 수준은 코어공시체(그림 3.27)보다 높은 편이고 R^2 값도 코어 어느 정도 높게 나타나 비교적 양호한 편인 $R^2 = 0.58$ 이다. 이 정도 수준이면 어느 정도 경향을 알 수 있으며 이는 공시체 직경이 크면 SMA 혼합물의 S_D 수준은 낮지만 WT과의 경향은 어느 정도 비슷함을 나타내는 것이다. 따라서 향후 더 직경이 큰 공시체를 사용해 S_D 를 측정하면 보다 좋은 결과를 얻을 수 있는 가능성이 있다 하겠다.

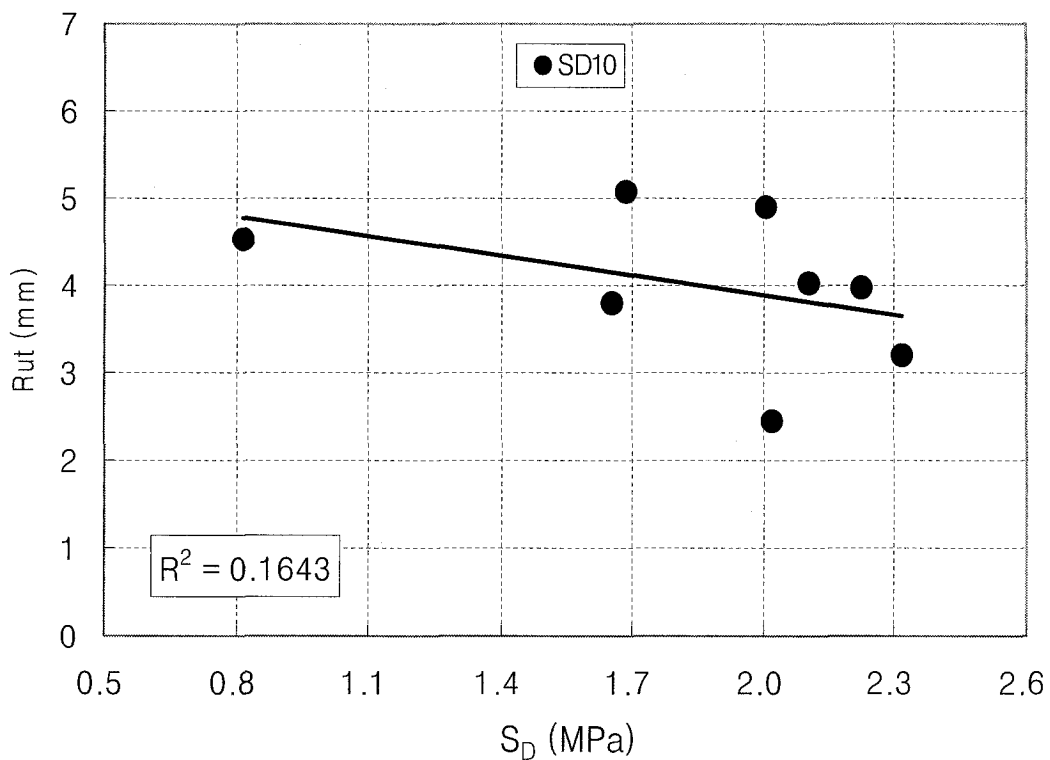


그림 3.27. WT 침하깊이와 코어 공시체의 상관성 분석

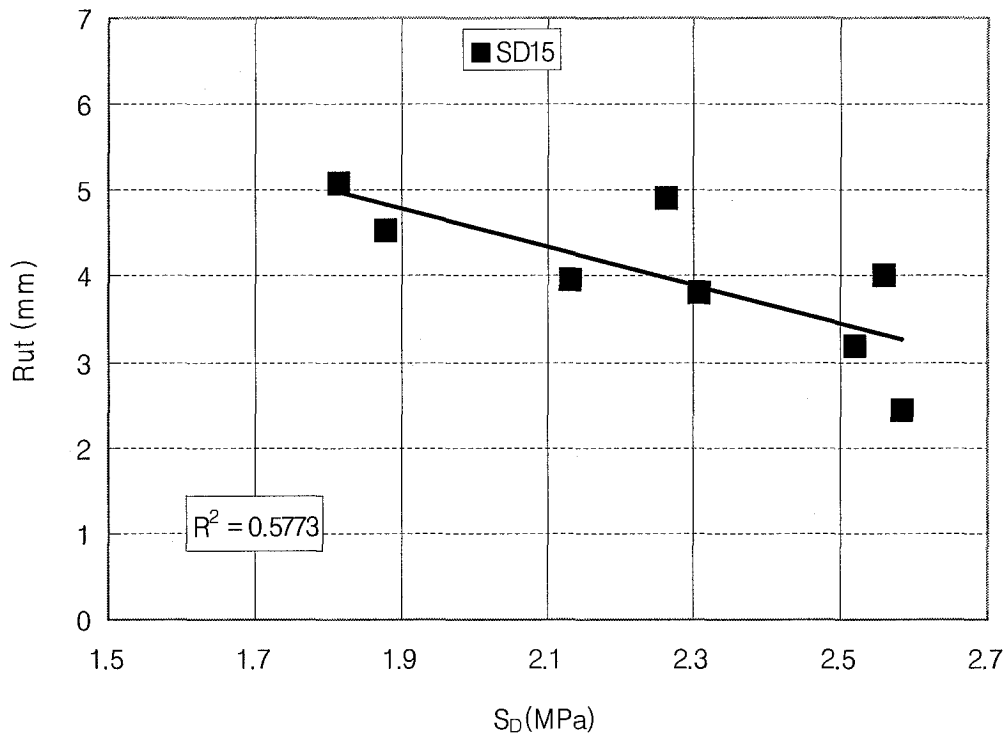


그림 3.28. WT 침하깊이와 선회다짐 공시체의 상관성 분석

그림 3.29은 코어공시체와 선회다짐 공시체의 변형강도를 골재 크기별로 상관성 분석한 것이다. SMA 혼합물의 변형강도는 전반적으로 낮기는 하지만 10mm의 경우는 100mm 코어와 150mm 선회다짐 공시체간에 상관성이 양호한($R^2 = 0.89$) 편이다. 하지만 13mm SMA 혼합물의 경우는 두 결과 간에 상관성이 좀 낮은 ($R^2 = 0.55$) 편으로 나타났다. 즉, 10mm SMA 혼합물에서는 비록 밀입도보다 좋지는 못하지만 입자가 작아 균질에 가까워 바인더 간에 어느 정도의 차이를 보이며 두 가지 공시체로 측정한 변형강도가 서로 상관관계가 높게 나타나는 편이라 할 수 있다. 하지만 입자가 더 큰 13mm의 경우에는 전체적인 강도도 더 낮고 특히 100mm 코어의 경우 그 값이 매우 낮아 변별력이 떨어지는 것으로 나타났다.

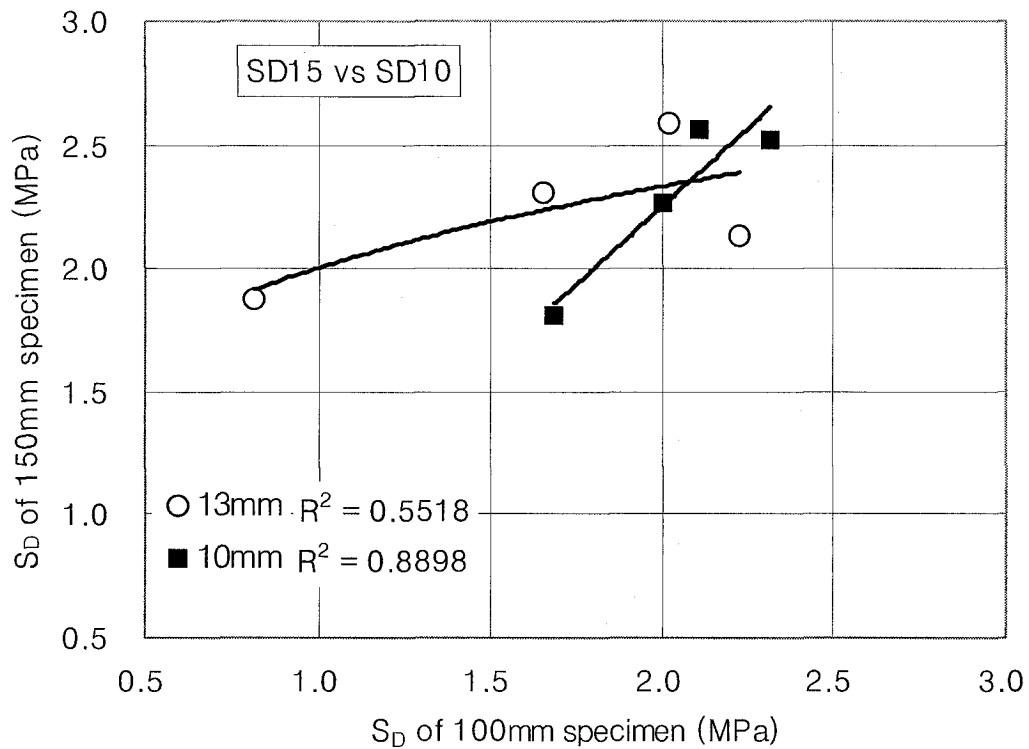


그림 3.29. 코어 공시체(100mm)의 변형강도와 선회다짐 공시체(150mm)의 상관관계

이를 통해 비록 SMA라도 10mm 골재의 경우와 같이 값이 낮기는 하지만 두 종류의 공시체로 측정한 변형강도가 혼합물의 상대적 강도 차이를 판정하는 시험법으로 적용가능해 보이지만 13mm의 경우는 곤란해 보인다. 이는 굵은골재 최대치수가 클수록 골재의 배열이 등방성(Isotropic)이지 못해 재료가 균질(Homogeneous)하지 않으므로 변동성이 높게 나타나기 때문인 것으로 보인다. 이에 비해 골재치수가 작으면 그 보다는 변동성이 줄어들어 10mm 골재 혼합물의 시험 값이 안정적인 것이라 할 수 있다.

그림 3.30, 3.31은 100mm 코어공시체와 150mm 선회다짐 공시체의 변형강도와 두 가지 동적 안정도 산정 방법에 대한 상관관계를 나타낸다. 100mm 코어공시체의 경우 R^2 값이 매우 낮게 나왔으나 동적안정도 산정방법을 비교하였을 때는 새로운 산정방법의 R^2 값이 다소 높은 값을 보인다. 150mm 선회다짐 공시체의 상관성은 코어공시체 보다는 조금 더 높게 나왔으며 역시 새로운 동적 안정도 산정 방법의 R^2 값이 KS 보다 더 크게($R^2 > 0.56$) 나타

났다.

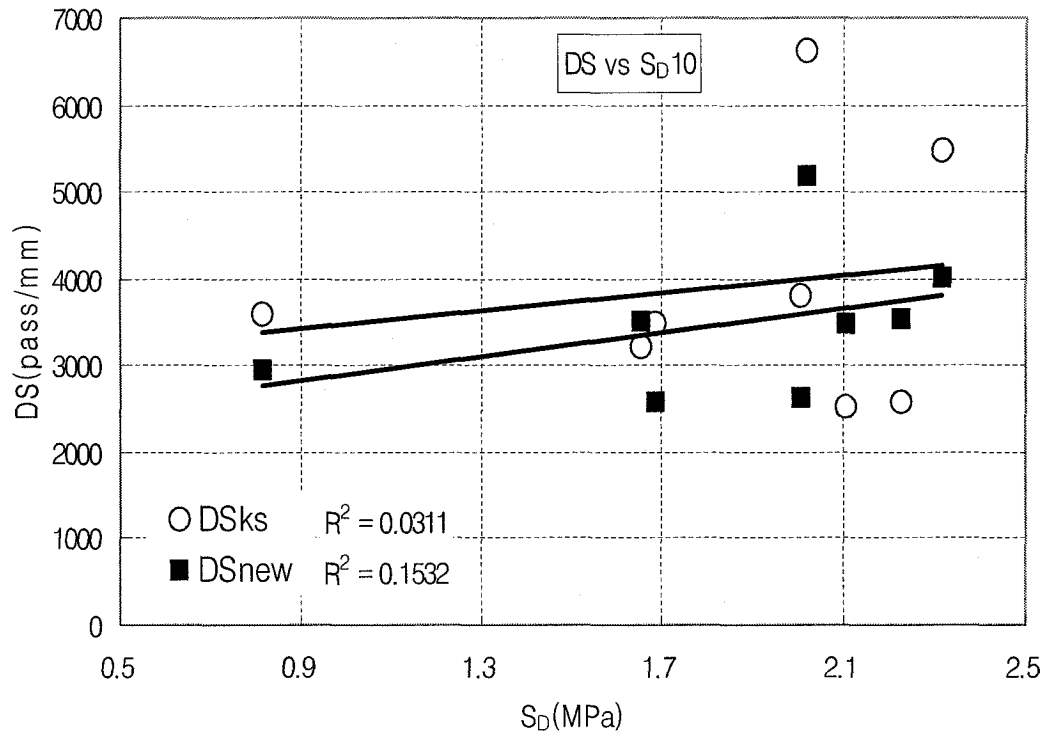


그림 3.30. 동적 안정도와 코어 공시체 변형강도의 상관성 분석

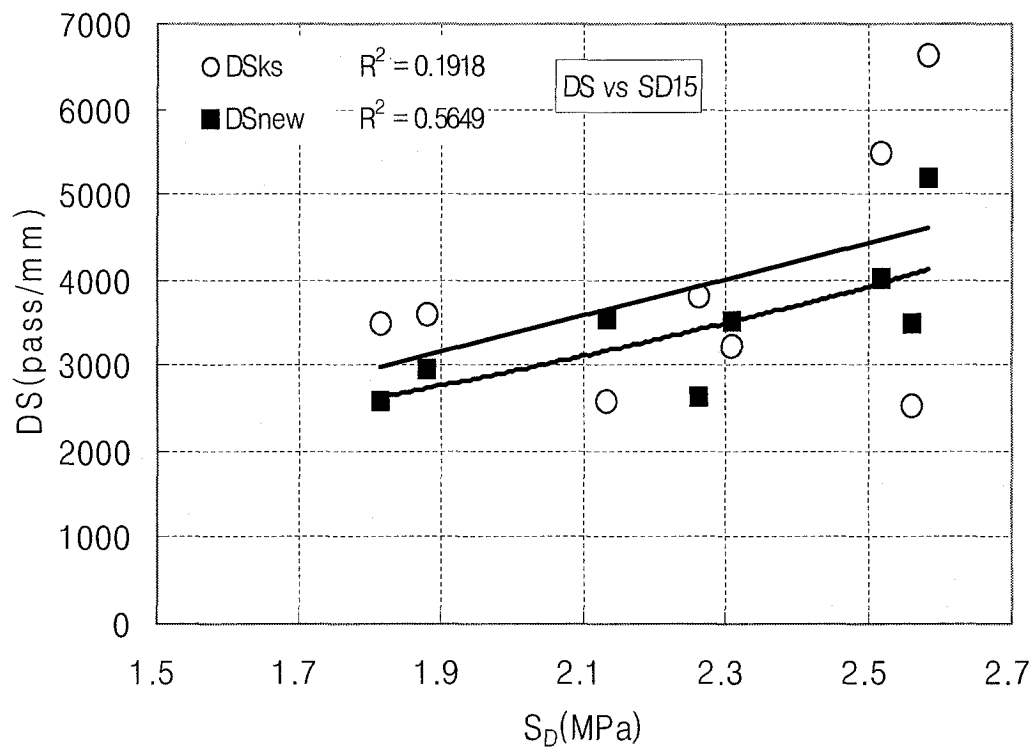


그림 3.31. 동적 안정도와 선회다짐 공시체 변형강도의 상관성 분석

끝으로 그림 3.32는 Wheel tracking test의 최종침하깊이에 대하여 KS로 산출한 동적안정도와 새로운 계산식에 의해 산출된 동적안정도의 상관성을 분석한 것이다. 그래프에서 알 수 있듯이 새로운 동적안정도와 최종침하깊이의 R^2 값이 0.9893로 매우 높게 나타났다. 이는 KS 동적안정도와 최종침하깊이의 R^2 값이 0.725인 것과 비교하여보면 새로운 동적안정도 산출식이 아스팔트 혼합물의 소성변형 저항성을 평가하는데 더 적합하다는 것을 나타낸다.

미국이나 유럽의 경우 동적안정도라는 개념이 없이 주로 WT의 최종침하깊이 만을 위주로 혼합물의 소성변형저항성을 평가하는데 KS의 동적안정도 산정방법은 그림에서 보듯이 점 들이 회귀곡선과의 산포가 크다. 특히 rut depth가 3.5mm 이상 커지면서 그 산포가 더 크게 나타나 혼합물의 소성변형저항성이 낮을수록 KS동적안정도가 rut depth와 상관성이 떨어지는 것으로 나타났다.

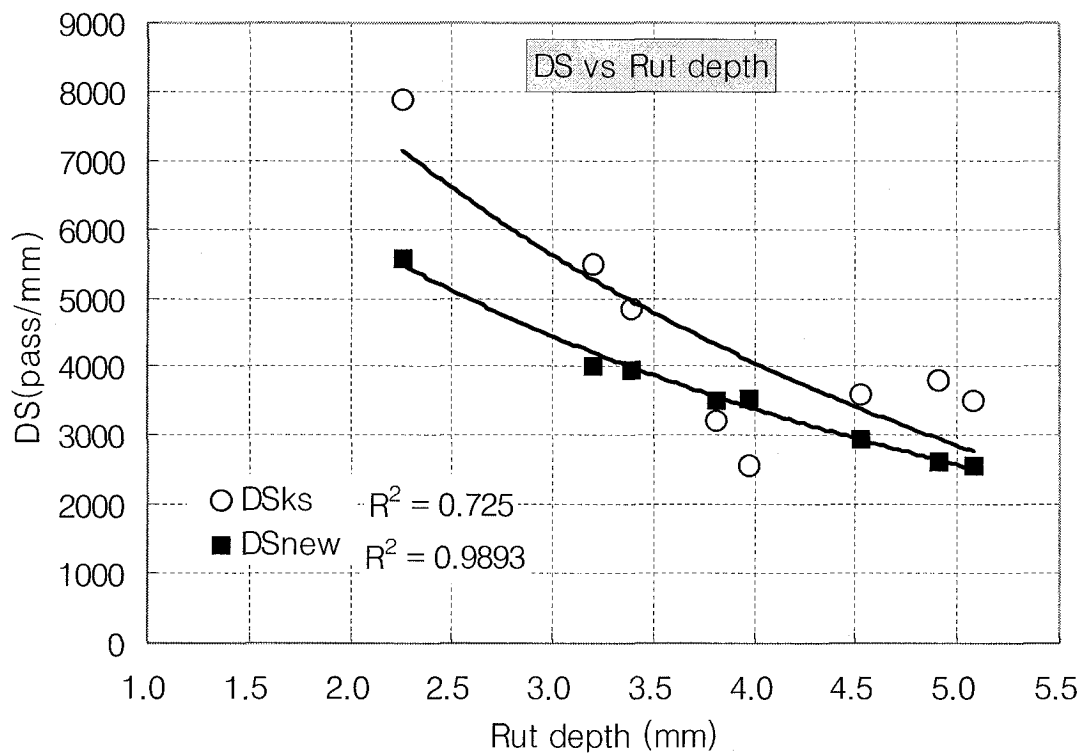


그림 3.32. 동적 안정도와 최종 침하깊이의 상관성 분석

이제까지의 상관성 분석에서 알 수 있듯이 13mm 혼합물 보다 10mm 혼합물의 상관관계 분석이 눈에 띄는 변별력을 갖고 상관성도 양호한 것으로 나타났다. 이는 변형강도 시험 시 하중봉이 공시체에 국부적인 압력을 가하는 상황에서 응력 상태가 굵은골재의 골격으로 하중을 지지하는 SMA 경우 최대 치수에 따라 편차가 클 확률이 높기 때문이라 여겨진다. 특히 골재의 입형이 좋지 못한 장편석이 많은 경우 그 편차 확률은 더욱 커지기 때문일 것이다.

마. 원인 분석

밀입도 혼합물의 경우 모든 재료(잔골재, 굵은골재, 채움재, 바인더)가 치밀하게 채워진 혼합물로 균질(Homogeneous)에 가깝고 혼합물 전체가 일체화되어 하중을 지지하며 어느 정도 등방성(Isotropic)이라 볼 수 있다. 하지만 잔골재가 적게 들어간 SMA의 경우 굵은골재 낱알이 골격(skeleton)을 이루며 하중을 지지하고 있어 그렇게 보기 어렵다. 이 같은 현상은 굵은골재 최대치수가 클수록 더 심하여 하중-변형 곡선에서 13mm 골재 SMA가 10mm에 비해 곡선이 부드럽지 못하게 나타난다. 즉, 입자가 굵은 13mm의 경우 골재골격이 부서지는 순간마다 곡선이 튀는 듯한 모양을 보인다. 이는 혼합물 내에 있는 화이버와 두꺼운 filler+바인더 필름 층이 골격을 이루고 있는 골재가 측방으로 전단을 받을 경우 쉽게 밀려나는 (구조물의 Buckling과 유사한) 원인을 제공하기 때문인 것으로 보인다.

밀입도의 경우 굵은골재가 매트릭스(잔골재, filler, 바인더 결합체) 사이에 들어있어 압밀은 물론 전단에 의해 측방으로 밀려도 균질의 재료처럼 일률적으로 변형이 일어나나, SMA는 다짐시 주력방향인 수직으로 형성된 골격의 일부 골재가 S_D 시험에서 전단으로 밀려 이탈되면 취약해지는 것으로 추정된다. 따라서 전단에 의한 측방향 밀림에 대한 저항성이 취약해 S_D 값이 유사한 wheel tracking (WT) 결과를 보이는 밀입도 혼합물에 비해서도 전반적으로 낮게 나타난다. 또한 실제도로에서 SMA의 우수성과 비교시

WT 시험 결과도 밀입도 보다 좋지 못해 S_D 는 물론 WT 시험도 SMA의 소성변형 저항성을 평가하는데 문제가 있음을 확인하였다.

하지만 변형강도(S_D) 시험법 자체는 10mm SMA의 결과를 통해 볼 때 SMA 재료의 소성변형 저항성을 상대적으로 측정할 수 있는 어느 정도 유효한 방법인 것으로 판단된다. 즉, 골재치수가 작을수록 재료가 균질에 가깝게 배열되므로 밀입도의 경우와 함께 고려한다면 S_D 시험은 재료가 균질(Homogeneous)할 수 록 더 효과적이라 할 수 있다. 단, 앞서 언급했듯이 SMA 재료의 구조적 특성상 전반적으로는 절대값이 낮아 현재의 S_D 방법만으로 SMA 혼합물의 소성변형 특성을 판단하는 데는 한계가 있다고 사료된다. 따라서 변형강도 시험 시 하중 봉 하단의 원형 절삭이 전단을 야기하며, 자연적인 측면 구속효과를 내는 공시체의 측면 크기는 직경 100mm 공시체의 경우 $30\text{mm} = [(100-40)/2]$, 150mm 공시체의 경우 55mm로 한정되어있어 공시체에 국부적인 압력을 가하는 상황에서 균열이 발생하며 취약해지는 것으로 보인다. 즉, 굽은골재의 골격으로 하중을 지지하는 SMA 경우 굽은골재 최대치수가 커짐에 따라 편차가 클 확률이 높아지기 때문이며, 게다가 골재의 입형이 좋지 못한 장편석이 많은 경우 그 편차 확률은 더욱 커지기 때문이다. 따라서 공시체 직경을 더 크게 하여 이를 보완할 필요가 있다.

또한 WT도 마찬가지로 SMA의 특성을 제대로 반영하지 못하므로 특수 아스팔트 혼합물에 대한 측정 방법은 전체적으로 별도의 체계적인 연구가 필요하다고 사료된다.

5. 배수성 혼합물의 변형강도 분석

가. 국내 배수성 혼합물

본 연구는 배수성 혼합물의 변형강도와 WT 시험결과와의 상관성 분석을 통해 배수성 혼합물의 강도특성 평가방법으로 변형강도의 적용가능성을 확인하고 상관관계가 양호할 경우 변형강도를 이용한 배수성 혼합물 배합설계 방법 개발 가능성을 확인하기 위하여 수행되었다. AP-5 밀입도 혼합물의 경우는 배수성 혼합물과의 변형강도에 대한 유의성을 관찰하기 위하여 수행하였다.

1) 배합설계

국내에서는 배수성 혼합물의 배합설계에 물성 및 침강손실률과 회전충격 손실률을 적용한다. 배수성 혼합물의 경우 공시체 제조는 마샬 다짐기 (Mashall compactor)로 하지만 마샬 안정도나 흐름치를 적용하지 않는다. 표 3.11은 배수성 혼합물의 배합설계 기준을 나타낸다.

표 3.11. 배수성 혼합물의 배합설계 기준

항목	기준
안정도(kg)	500 이상
흐름값(1/100cm)	20 ~ 40
수침 마샬잔류안정도(%)	75 이상
공극률(%)	20 이상
칸타블로 시험값(%)	20 이하
드레인 다운 시험값(%)	0.3 이하
현장투수능력(sec)	10 이내
동적안정도(회/mm)	3,000 이상

배합설계는 아스팔트 함량을 4.0%, 4.5%, 5.0%, 5.5%, 6.0% 까지 5단계로 변화시켜 가며 마샬 다짐기로 혼합물을 다짐하였다. 다짐 횟수는 양면 50회 다짐이 기준이다. 이를 통해 본 연구에서는 13mm와 10mm 혼합물의 공극률 20% 이상의 기준을 목표로 배합설계를 수행하였다.

칸타블로 시험은 바인더 함량을 0.5%씩 변화시켜 만든 마샬 공시체를 LA 마모시험기를 통해 충격에 의한 골재입자의 이탈 저항성을 측정한다. LA 마모시험기에 철구를 넣지 않고 300회 회전시켜 시험후의 손실량을 측정하고 시험 전에 측정된 마샬 공시체와의 무게 비율을 통해 측정한다.

드레인 다운 시험은 배수성 혼합물을 혼합한 뒤 종이가 깔려 있는 팬에 1kg을 고르게 펴 170±2℃로 유지되는 오븐에 1시간 동안 넣어둔다. 이때 팬에 있는 종이의 무게는 사전에 측정되어있어야 하며 모든 혼합물에 대하여 동일한 크기의 종지와 팬을 사용하여야한다. 또한 종지의 무게는 1시간 동안 170℃ 오븐에서 보관 후에 감소되기 때문에 혼합물을 제외한 종지만을 오븐에 보관하고 종지의 무게 감량을 측정해야한다. 1시간 뒤 오븐에서 혼합물을 꺼내어 팬에서 혼합물을 비운 후 종지의 무게를 측정한다. 드레인 다운 시험 값은 종지에 남은 혼합물 바인더의 손실된 무게를 혼합물에 대한 비율로 산정한 값이다.

표 3.12는 배수성 혼합물의 배합설계 결과를 나타낸다. 표 3.12의 결과로서 대부분 배수성 혼합물의 공극률이 20% 이상이며 침강손실률과 회전 충격 손실률의 결과 값이 최적 아스팔트 함량(OAC)에서 모두 기준에 만족하는 것으로 나타났다.

표 3.12. 배수성 혼합물의 배합설계 결과

혼합물	굵은골재 최대치수 (mm)	OAC (%)	두께 (mm)	건조 중량 (g)	밀도 (g/cm ³)		공극율 (%)	침강 손실률 (%)	회전 충격 손실률 (%)
					실측	이론			
화강암 AP-5(밀입도)	10	6.6	63.0	1124.3	2.324	2.402	3.26	-	-
	13	5.3	62.9	1126.7	2.332	2.440	4.44	-	-
L6F0.3 (LDPE6Fiber0.3)	10	5.1	68.3	1072.6	1.937	2.479	21.86	0.22	19.85
	13	4.8	66.6	1073.3	1.987	2.534	21.59	0.25	19.34
PQFC (RL2RH2CRM5)	10	5.3	67.3	1073.7	1.967	2.520	21.94	0.25	14.63
	13	4.9	67.1	1061.7	1.952	2.460	20.30	0.16	17.4
L5E10 (LDPE5EPDM10)	10	4.6	68.7	1074.5	1.930	2.454	21.34	0.30	17.02
	13	4.6	67.0	1075.4	1.979	2.469	19.85	0.29	12.00

2) 반복주행 시험

배수성 혼합물의 변형강도 결과와 반복주행 시험결과와의 상관성을 분석하기 위하여 반복주행시험을 수행하였다. 배합설계를 거쳐 결정된 최적 아스팔트 함량으로 혼합물을 제조하여 단기 노화를 거친 후 30.5cm × 30.5cm × 6.2cm의 슬래브 공시체를 롤러 다짐으로 제작하였다. 각 혼합물별로 제작된 슬래브는 12시간 이상 상온에서 식힌 후 몰드에서 탈영하여 물성 시험을 통해 공극을 확인하고 그림 3.16과 같이 170mm와 130mm로 잘라 25°C 항온·항습기에서 24시간 보관하였다. 공극을 비롯한 배수성 혼합물 기준을 만족하는 공시체에 대하여 130mm 슬래브는 반복주행 시험을 하고 170mm 공시체는 3개의 100mm코어를 채취하여 변형강도 시험을 수행하였다.

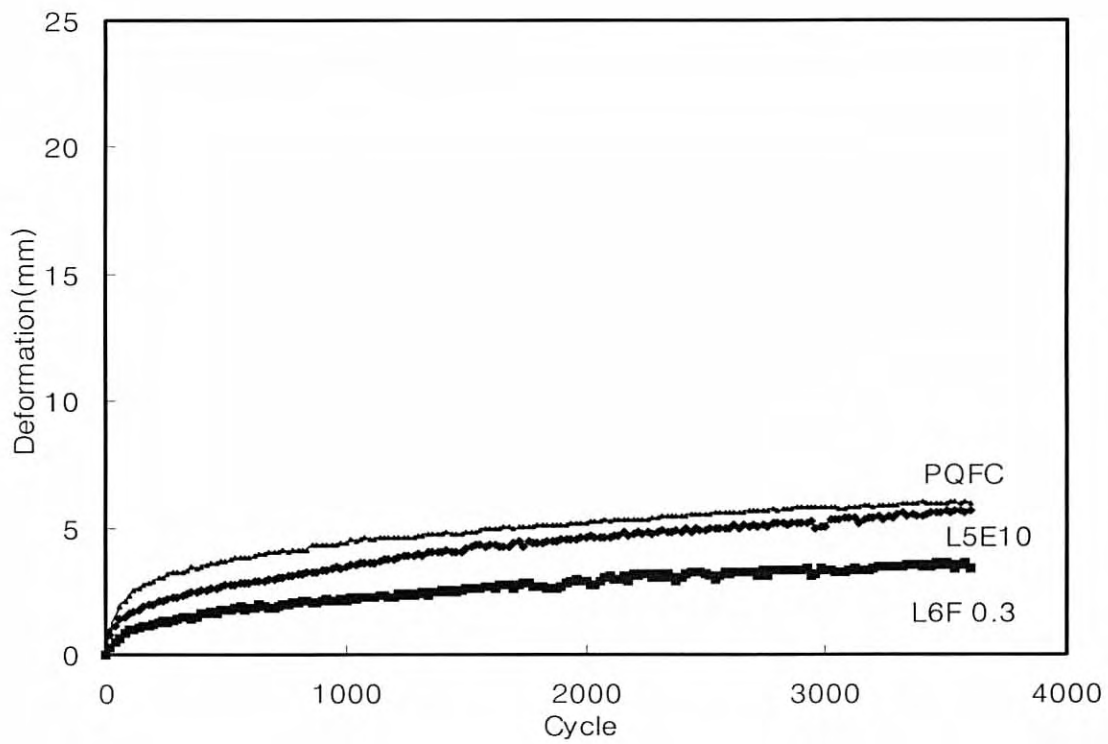
표 3.13은 제작된 배수성 혼합물의 슬래브 공시체의 물성 결과이다. 표 3.14와 그림 3.33의 (a),(b)는 굵은 골재 최대입도 10, 13mm 배수성 혼합물의 반복주행시험 결과를 나타낸다.

표 3.13. 배수성 혼합물의 슬래브 공시체 물성 결과

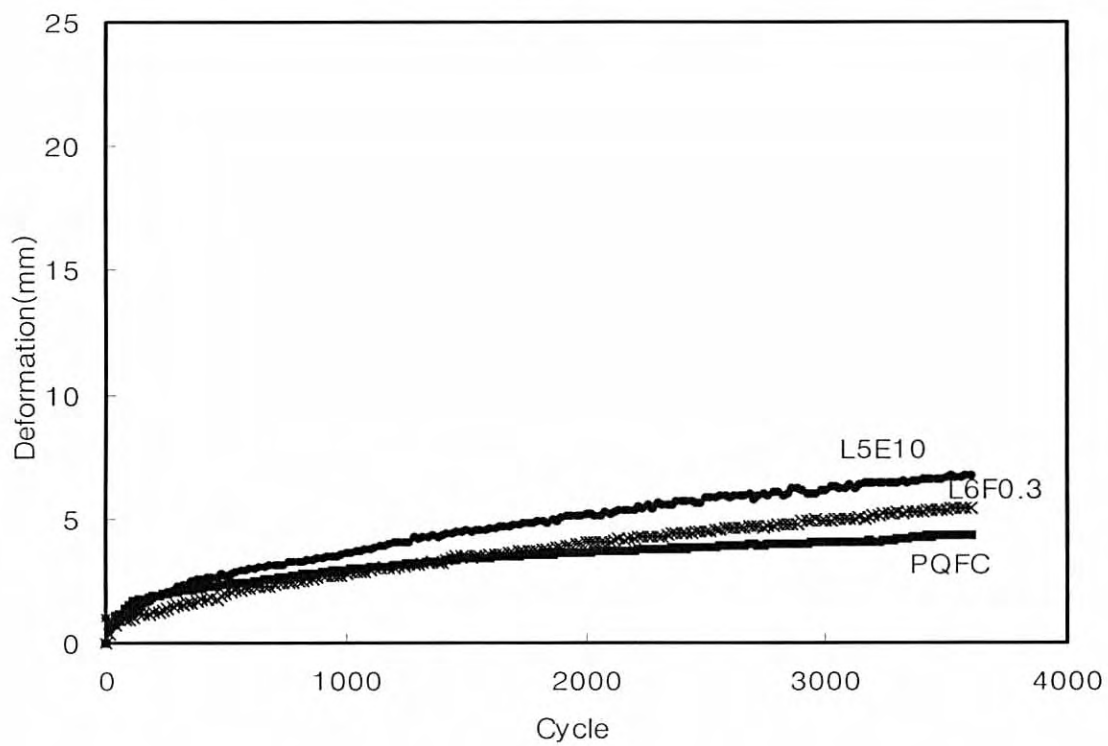
혼합물	굵은골재 최대치수 (mm)	OAC (%)	두께 (mm)	건조중량 (g)	밀도(g/cm ³)		공극율 (%)
					실측	이론	
L6F0.3	10	5.1	62.5	11599.0	1.995	2.472	19.30
	13	4.8	62.8	11830.0	2.025	2.530	19.96
PQFC	10	5.3	64.5	11868.7	1.978	2.520	21.50
	13	4.9	62.0	11537.8	2.000	2.541	21.27
L5E10	10	4.6	62.0	11421.0	1.980	2.454	19.31
	13	4.6	62.8	11475.4	1.964	2.469	20.44

표 3.14. 배수성 혼합물의 반복주행 시험 결과

Mixture	Max size (mm)	Dynamic stability(Pass/mm)		Rut Depth (mm)
		KS	New	
L6F0.3	10	7412	4000	3.44
	13	1636	2799	5.44
PQFC	10	3600	2177	6.00
	13	3000	3101	4.37
L5+E10	10	2423	2452	5.65
	13	1355	2178	6.71



(a)



(b)

그림 3.33. 10, 13mm 배수성 혼합물의 반복주행시험 결과 (a) 10mm 배수성 혼합물, (b) 13mm 배수성 혼합물

표 3.13에서 대부분의 슬래브 공시체의 공극률이 20% 이상 기준에 충족하였다. 표 3.14의 반복주행 시험 결과에서 10mm, 13mm 혼합물을 비교할 때 최종침하깊이의 평균이 유사하여 골재크기에 따른 소성변형에 대한 저항성에는 별 차이가 없는 것으로 나타났다.

3) Kim-test

배합설계는 10mm와 13mm 골재를 3가지 바인더를 사용하여 수행되다. 슬래브 공시체로부터 얻어진 코어 공시체 100mm와 선회 다짐기로 75회 선회 다짐하여 제작된 150mm 공시체의 혼합물을 60℃ 온도에서 시험 전 30분간 수침 후 꺼내서 변형강도의 측정을 위해 직경 $D=40\text{mm}$, $r=10\text{mm}$ 의 하중봉을 통해 수직으로 정하중을 30mm/min로 가한다. 표 3.15는 선회 다짐기로 75회 선회 다짐하여 제작된 150mm 공시체의 물성과 변형강도 시험결과이고 표 3.16은 슬래브 공시체로부터 얻어진 코어 공시체 100mm의 변형강도 시험결과를 나타낸다.

표 3.15. 150mm 공시체의 변형강도 결과

종류	OAC (%)	두께 (mm)	중량 (g)	밀도(g/cm^3)		공극율 (%)	P (N)	Y (mm)	S_D (MPa)
				실측	이론				
L6F0.3 - 10mm	5.1	72.0	2398.4	1.885	2.472	23.75	1050	2.6	1.200
L6F0.3 - 13mm	4.8	70.5	2396.5	1.924	2.530	23.97	975	3.2	1.038
PQFC - 10mm	5.3	70.8	2388.7	1.909	2.520	24.24	1023	3.6	1.044
PQFC - 13mm	4.9	68.7	2399.0	1.976	2.541	22.23	1912	4.6	1.798
L5E10 - 10mm	4.6	72.1	2400.1	1.884	2.454	23.24	645	3.4	0.671
L5E10 - 13mm	4.6	71.0	2395.1	1.909	2.469	22.68	900	3.9	0.890

표 3.16. 100mm 코어 공시체의 변형강도 결과

종 류	OAC(%)	번호	P(N)	Y(mm)	S _D (MPa)
L6F0.3 - 10mm	5.1	1	741	3.6	0.774
		2	849	3.5	0.899
		3	741	4.3	0.729
평 균			777	3.8	0.801
L6F0.3 - 13mm	4.8	1	336	4.4	0.320
		2	429	4.1	0.418
		3	546	5.0	0.499
평 균			437	4.5	0.412
PQFC - 10mm	5.3	1	230	3.7	0.232
		2	378	5.4	0.337
		3	234	6.3	0.200
평 균			281	5.1	0.256
PQFC - 13mm	4.9	1	1026	2.9	1.127
		2	1050	2.6	1.193
		3	1008	1.9	1.273
평 균			1028	2.5	1.198
L5E10 - 10mm	4.6	1	852	4.3	0.820
		2	1032	4.2	0.998
		3	849	4.4	0.539
평 균			911	4.3	0.786
L5E10 - 13mm	4.6	1	654	5.0	0.876
		2	825	4.4	0.785
		3	675	4.6	0.633
평균			718	4.7	0.765

표 3.15의 150mm 공시체는 공극률이 20% 이상 기준에 충족하였다. 변형강도 결과는 100mm와 150mm 공시체를 비교할 때, 10mm의 LDPE5+ EPDM10를 제외한 대부분 150mm공시체가 100mm공시체보다 변형강도가 크게 나타났고, 골재크기에 따라 비교할 때 크게 차이가 없는 것으로 나타났다.

하지만 배수성 혼합물 역시 SMA와 마찬가지로 S_D 값이 매우 낮아 밀입도와 비교시 변형강도로 그 특성을 평가하기 힘들 것으로 보인다. 이 역시 혼합물의 구성이 주로 굵은골재로 이루어져 바인더의 특성보다는 골재의 골격으로 하중을 지지하기 때문이다.

4) 상관성 분석

이전까지의 연구에 따르면 공시체 직경 크기에 따라 변형강도에 차이가 남을 알 수 있다. 대체로 100mm 코어 공시체보다 150mm 공시체의 변형강도가 큰 것으로 나타났다. 따라서 배수성 혼합물도 두 가지 직경의 공시체를 제조하여 그 특성을 측정하였다.

표 3.17은 배수성 혼합물의 변형강도와 WT 시험결과를 정리한 것이다. 변형강도는 매우 낮아 1MPa 전후이고 WT 침하깊이도 3.44 - 6.71mm로 밀입도 무개질 혼합물 정도의 수준이었다. 또한, 그림 3.34~3.36은 골재크기와 공시체 크기에 따른 WT 시험의 최종침하깊이와의 상관관계를 회귀분석을 통하여 구분하여 나타내었다.

그림에서 볼 있듯이 배수성 혼합물의 변형강도와 WT 시험에서의 최종 침하깊이와의 상관성은 공시체의 크기, 골재의 크기에 관계없이 매우 낮게 나타났다. 비록 13mm 골재로 만든 150mm 공시체의 회귀분석은 비교적 높은 R^2 을 보이지만, 전반적으로 R^2 의 값이 평균 0.4 이하로 상당히 낮은 것으로 나타났다. 따라서 변형강도를 통해 배수성 혼합물의 소성변형저항성을 평가하기 어려운 것으로 판단되었다.

표 3.17. 배수성 혼합물의 변형강도와 WT 시험결과

종류	S _D (MPa)		Rut Depth (mm)
	100mm	150mm	
L6F0.3 - 10mm	0.801	1.200	3.44
L6F0.3 - 13mm	0.412	1.038	5.44
PQFC - 10mm	0.256	1.044	6.00
PQFC - 13mm	1.198	1.798	4.37
L5E10 - 10mm	0.786	0.671	5.65
L5E10 - 13mm	0.760	0.890	6.71

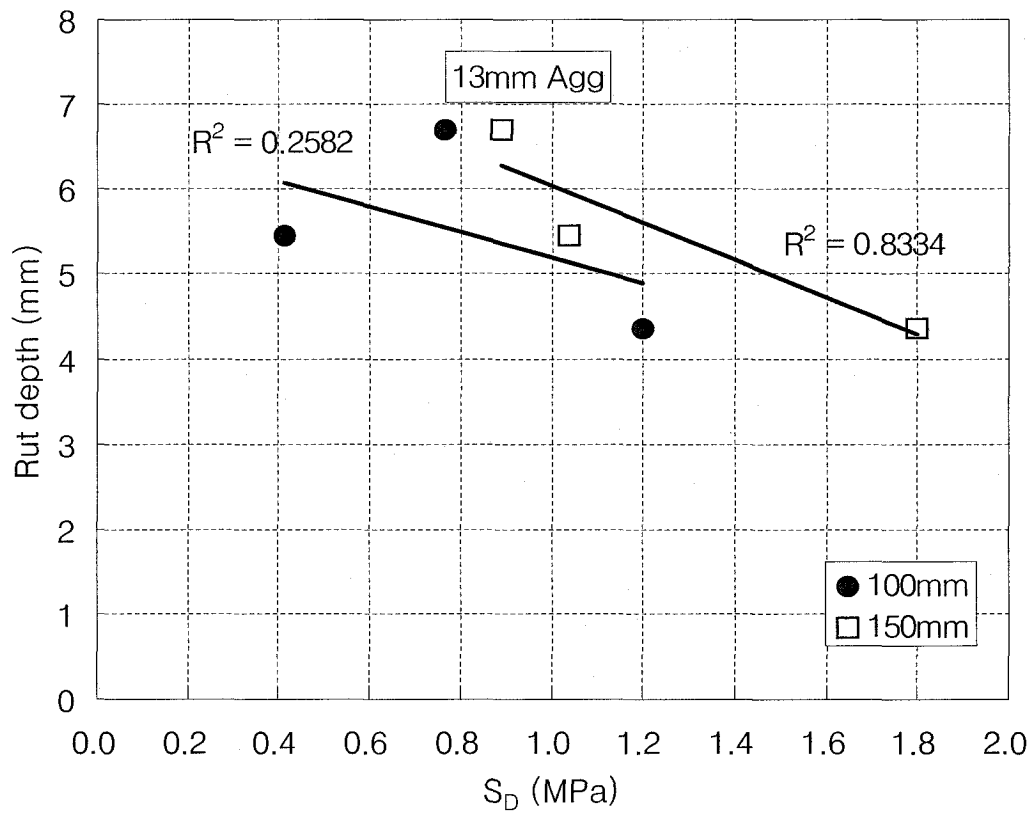


그림 3.34. 공시체별 변형강도와 WT시험의 최종침하깊이와의 상관관계(100mm)

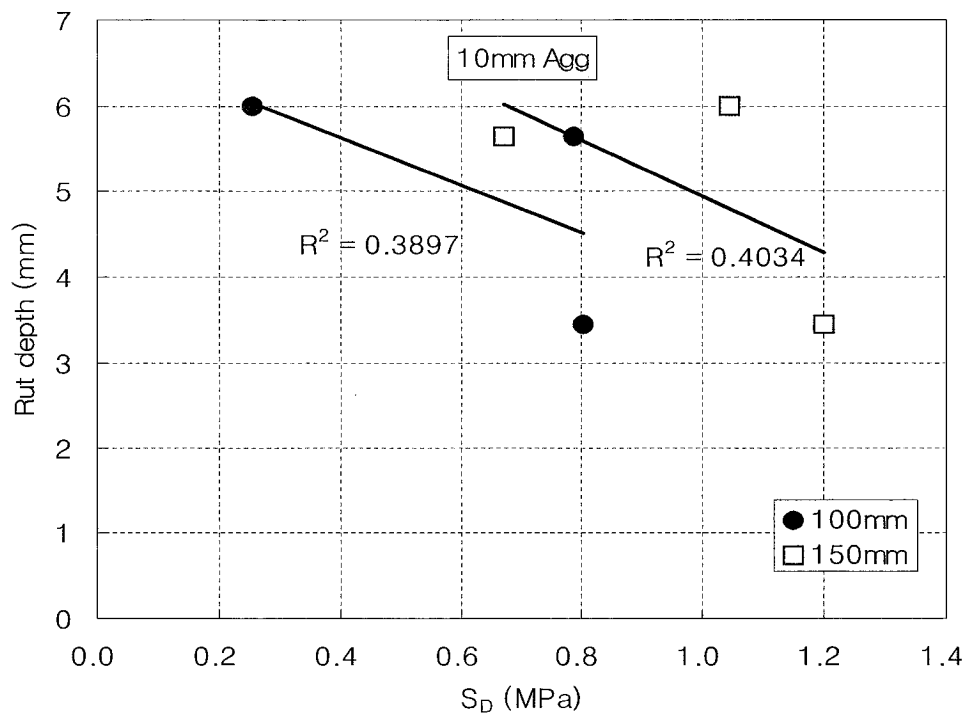


그림 3.35. 공시체별 변형강도와 WT시험의 최종침하깊이와의 상관관계(150mm)

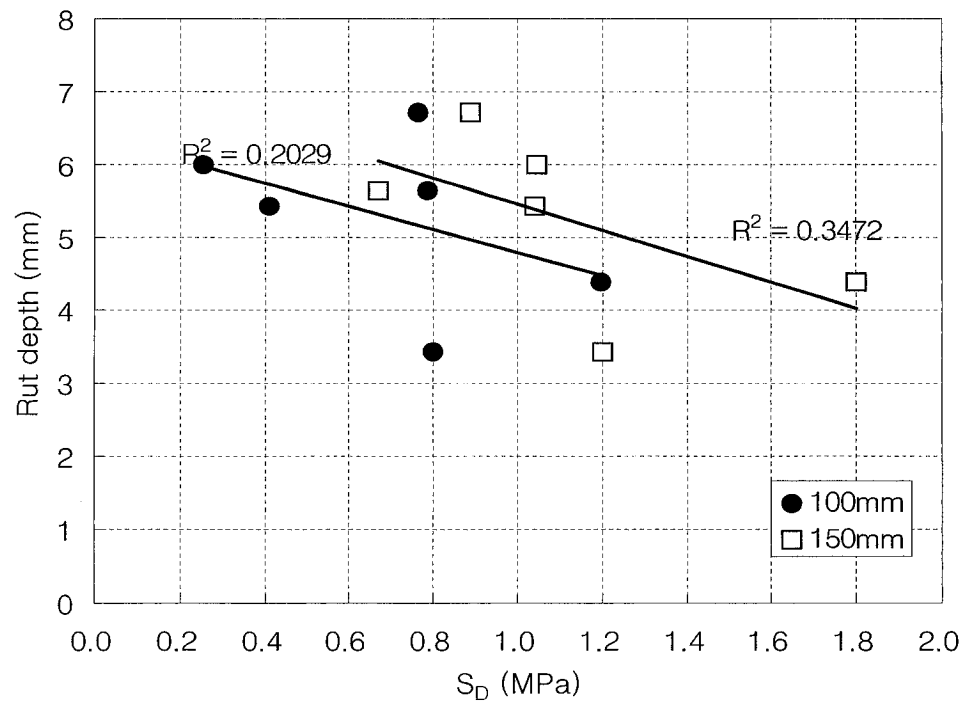


그림 3.36. 공시체별 변형강도와 WT시험의 최종침하깊이와의 상관관계(종합)

나. 미국 SC의 OGFC 혼합물

미국 배수성 혼합물인 Open-graded friction course (OGFC) 혼합물의 강도특성 평가방법으로 변형강도의 적용가능성을 확인하기 위하여 변형강도와 APA 시험결과와의 상관성 분석을 수행하였다. 표 3.18은 배합설계 된 혼합물의 물성을 보여준다.

표 3.18. OGFC 혼합물의 OAC에서의 침강손실률 확인

혼합물	굵은골재 최대치수 (mm)	OAC (%)	공극율 (%)	침강 손실률 (%)
PG76-22	10	6.0	17.27	0.15
	13	6.0	16.34	0.12
L6 (LDPE 6%)	10	5.9	16.72	0.10
	13	5.9	16.22	0.09
R12 (CRM 12%)	10	7.2	16.69	0.03
	13	7.2	16.26	0.03
L5E10 (LDPE5%+EPDM10%)	10	6.0	16.98	0.02
	13	6.0	16.50	0.01
R10 (CRM 10%)	10	6.8	17.01	0.02
	13	6.8	16.18	0.01
PQFC (RL2% RH5% CRM5%)	10	6.5	16.48	0.02
	13	6.5	16.11	0.02

표 3.19는 OGFC 혼합물의 APA와 변형강도 결과를 나타낸다. 그리고 그림 3.37은 APA 침하 깊이와 변형강도 값의 상관성을 분석한 그래프이며 그림 3.38은 이를 골재의 크기별로 분류한 것이다. 그림 3.37에서 보면 미국의

배수성 혼합물인 OGFC의 APA 저항특성을 나타내는 침하깊이는 변형강도와 어느 정도 양호한 상관관계($R^2 > 0.66$)가 있는 것으로 나타났다. 그리고 이를 골재 최대크기별로 분류하여 보면 골재의 입자가 작은 10mm 혼합물이 보다 나은 R^2 값을 보임을 알 수 있다.

표 3.19. OGFC 혼합물의 APA와 변형강도

Mixture	Max size (mm)	S_D (MPa)	Rut Depth (mm)
PG76 (SBS PG76-22)	10	2.660	3.94
	13	2.742	4.43
L6 (LDPE 6%)	10	4.156	1.51
	13	4.218	1.18
R12 (CRM 12%)	10	3.490	3.40
	13	3.686	3.55
L5E10 (LDPE5%+EPDM10%)	10	2.865	2.38
	13	2.679	2.44
R10 (CRM 10%)	10	1.976	6.01
	13	2.147	5.28
PQFC (RL2% RH5% CRM5%)	10	3.536	3.40
	13	3.423	1.98

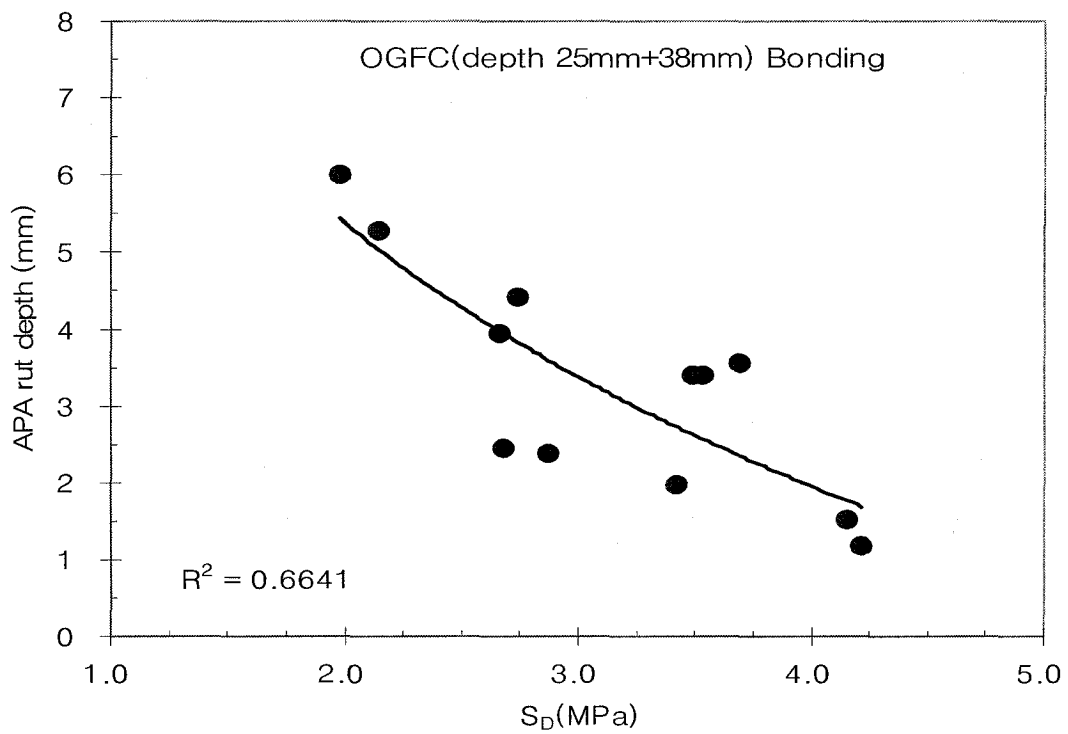


그림 3.37. OGFC 혼합물 전체의 APA rut depth와 S_D 의 상관성분석

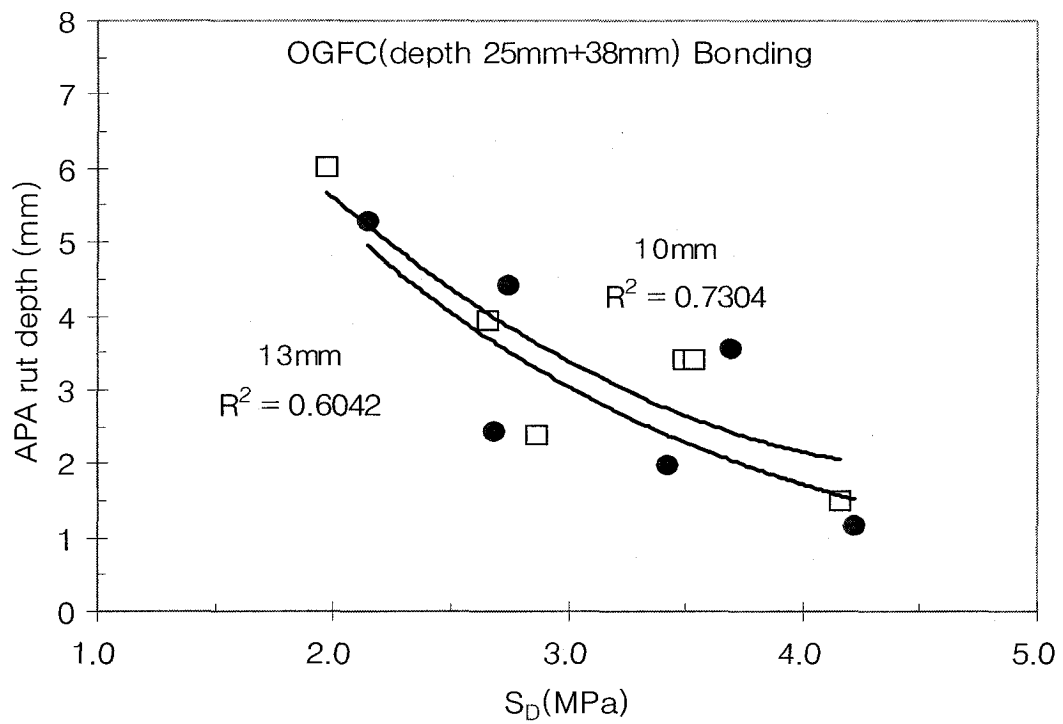


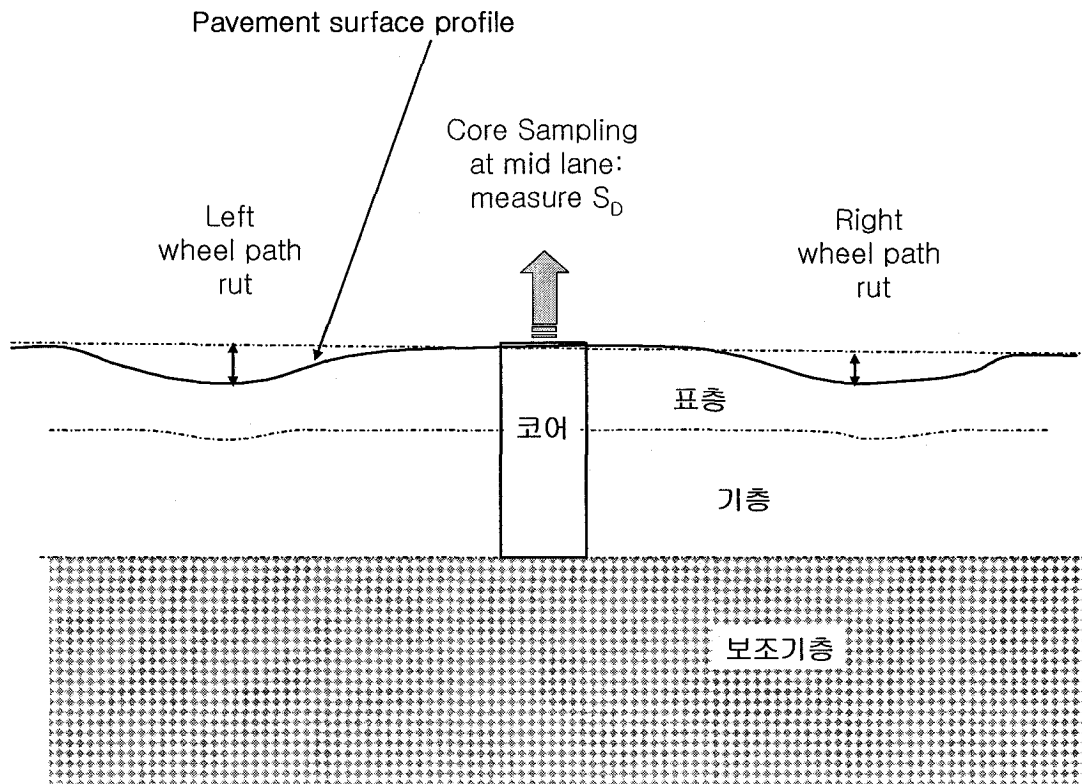
그림 3.38. 굵은골재 최대치수별 OGFC 혼합물의 APA rut depth와 S_D 의 상관성분석

6. 현장 소성변형과 코어의 변형강도

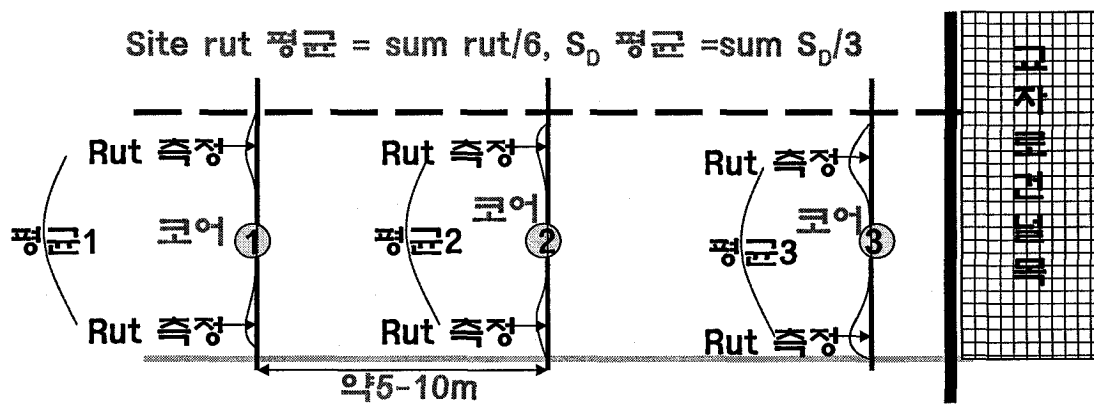
시험포장 지역의 포장 노면상태를 분석하고 이곳에서 코어를 그림 3.39와 같이 채취하여 코어에 대한 S_D 의 측정을 통해 공용성과 S_D 의 상관성을 분석하였다. 이는 소성변형에 강한 재료가 포설된 곳의 소성변형 깊이는 약한 재료가 깔린 지역 보다 소성변형 깊이가 낮을 것이란 전제하에서 이루어진 것이다. 이를 위해 포장 재료의 소성변형 저항성 강약은 차로 중심부(Mid lane)에서 채취한 코어의 S_D 를 측정하여 확인하고 소성변형은 양 궤적의 침하 깊이를 측정하였다. 그림 3.39 (b)에서와 같이 각 site 별로 최소한 3곳의 코어를 채취하고, 코어 채취직전에 같은 선상의 좌우 최대 침하깊이를 측정하고 평균을 내어 해당 위치 코어에 대한 S_D 값과의 상관관계 분석에 사용하였다.

장소는 주로 신호대기지역 총 9곳(site)이며 일부는 1, 2차 년도에 코어 채취한 곳이며 일부는 작년엔 시험포장한 곳이다. 차로는 같은 위치에서 소성변형이 가장 심한 차로를 선정하였다. 채취된 코어는 실험실로 가져와 상부 60mm 정도가 되게 잘라 공극률과 변형강도를 측정하였으며 이는 표 3.20과 같다. 회귀분석에는 소성변형 깊이를 종속변수(y 값)로, 변형강도를 독립변수(x 값)로 사용하여 소성변형깊이와 S_D 의 상관관계를 분석하였다.

그림 3.40~3.41은 현장의 소성변형 상태와 같은 곳의 차로 중앙(Mid lane)에서 채취한 코어로부터 측정한 변형강도의 상관성 분석을 나타낸다. 회귀분석은 2008년도 데이터만으로, 연도 별로 그리고 3년간의 누적 data로 다양하게 수행하였다. 또한 2008년도는 사이트별 구분 없이 모든 데이터를 각각 한 점으로 회귀분석 한 것(그림 3.40)과 사이트별로 평균(그림 3.41)을 내어 회귀분석을 수행하여 비교하였다. 즉, 사이트별 평균 data는 3개의 S_D 와 6개의 침하깊이 데이터를 평균하여 한 점으로 사용한 것이다. 2008년 전체 코어 27개에 의한 소성변형과의 상관성을 나타내는 R^2 은 0.62이상으로 비교적 양호한 편이었다. 또한 이를 site 별로 평균을 내어 9 점으로 나타낸 회귀분석에서는 R^2 이 0.76이상으로 보다 더 양호한 것으로 나타났다.



(a)



(b)

그림 3.39. (a) 현장코어 채취위치와 rut depth 측정에 대한 모식도, (b) 각 사이트에 대한 그림 설명.

표 3.20. 현장 소성변형 상태 및 코어 변형강도 자료

장소	차로 구분	혼합물	No.	공극률 (%)	침하 깊이 (좌)	침하 깊이 (우)	평균 (mm)	S _p (MPa)
안디옥교회 지 홍천	1차로	AP5 밀입도 13mm	1	1.48	2	4.5	3.25	3.345
			2	0.53	3	5	4.00	2.784
			3	0.54	3	4	3.50	3.498
			평균	0.85	2.7	4.5	3.58	3.209
춘천역뒤 지 소양2교	1차로	AP5 밀입도 13mm	1	1.22	18	10.5	14.25	2.450
			2	-	-	-	-	-
			3	1.29	21	13.5	17.25	2.235
			평균	1.25	19.5	12	15.75	2.350
팔미리 1 지 매립장	1차로	AP5 밀입도 13mm	1	1.22	10	8	9.00	3.145
			2	2.32	8	11	9.50	2.614
			3	1.4	6	9	7.50	2.557
			평균	1.64	8.0	9.33	8.67	2.770
팔미리 2 지 매립장	1차로	LDPE 밀입도 13mm	1	2.45	6	6	6.00	2.434
			2	2.53	8	9	8.50	2.438
			3	3.69	6	9	7.50	2.989
			평균	2.89	6.7	8.0	7.33	2.620
금산2리 토공부 지 신매대교	1차로	AP5 밀입도 13mm	1	1.325	2	2	2.00	3.930
			2	2.12	5	5	5.00	2.598
			3	1.76	5	6	5.50	3.268
			평균		4.0	4.3	4.17	3.270
금산2리 교량직전 지 신매대교	1차로	AP5 밀입도 13mm	4	1.56	5	3	4.00	3.225
			5	1.46	7	3	5.00	2.908
			6	2.58	10	10	10.00	2.786
			평균	2.24	5.67	5.33	6.33	2.970
에버빌4거리 지 공지천	1차로	AP5 밀입도 13mm	1	1.69	5	4	4.50	2.730
			2	0.95	7	3	5.00	2.957
			3	0.84	8	6	7.00	2.862
			평균	1.16	6.67	4.33	5.50	2.850
석사4거리 지 교대	1차로	AP5 밀입도 13mm	1	1.78	10	13	11.50	1.837
			2	1.91	12	12	12.00	1.853
			3	1.88	13	13	13.00	1.956
			평균	1.86	10.67	10.67	12.17	1.882
서춘천농협 지 서울	1차로	AP5 밀입도 13mm	1	3.14	15	2	8.50	2.067
			2	2.43	12	7	9.50	2.015
			3	2.82	12	8(균열)	10.00	2.636
			평균	2.8	13	4.5	9.33	2.239

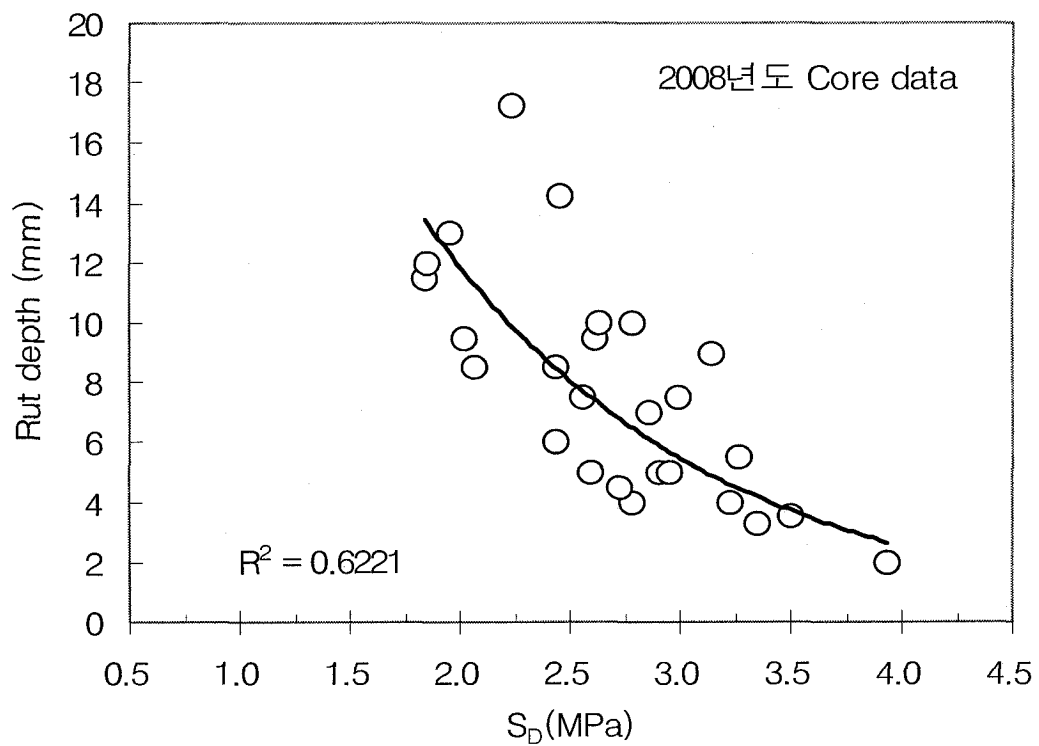


그림 3.40. 현장 rut depth와 코어 공시체에 대한 변형강도와의 상관성 분석

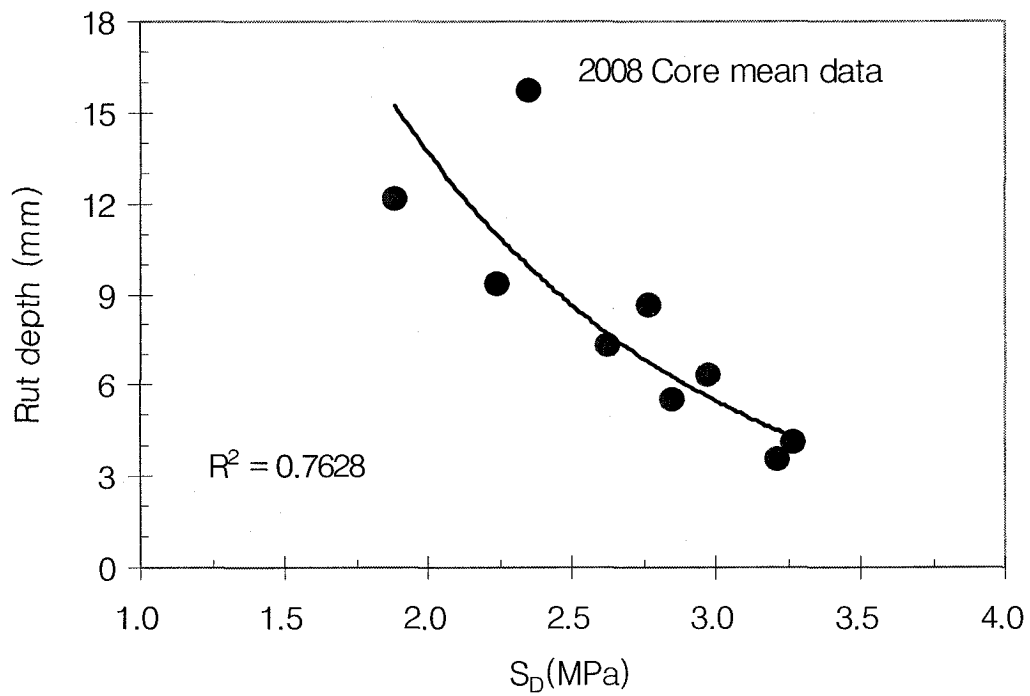


그림 3.41. 코어채취 위치별 rut depth의 평균과 코어 공시체에 대한 변형강도 평균과의 상관성 분석

또한 그림 3.42와 3.43은 3년에 걸쳐 측정한 소성변형과 채취한 코어의 변형강도의 평균값들로 상관관계를 분석한 그림이다. 그림 3.42에서 보듯이 3년에 걸쳐 그림 3.41과 같은 방식으로 연도별 평균을 모두 모아 회귀분석한 결과 R^2 는 0.71 이상으로 양호한 편이었다. 또한 이를 연도별로 구분하여 회귀분석을 수행한 것을 그림 3.43에서 보여준다. 매년의 위치가 다소 다르지만 코어 변형강도와 해당 위치에서 측정한 소성변형 깊이와의 상관관계는 R^2 이 0.5 이상, 0.76사이에 있는 것으로 나타났다.

이로부터 아스팔트 포장 콘크리트의 변형강도는 소성변형이 깊게 들어간 곳과 적게 들어간 곳에 간에 차이가 분명히 나타나며 소성변형 저항성이 큰 지역의 변형강도가 높게 나타남을 확인할 수 있었다. 즉, 혼합물의 변형강도가 강한 곳의 포장노면에서는 소성변형 깊이가 상대적으로 낮게 나타남을 확인할 수 있었다.

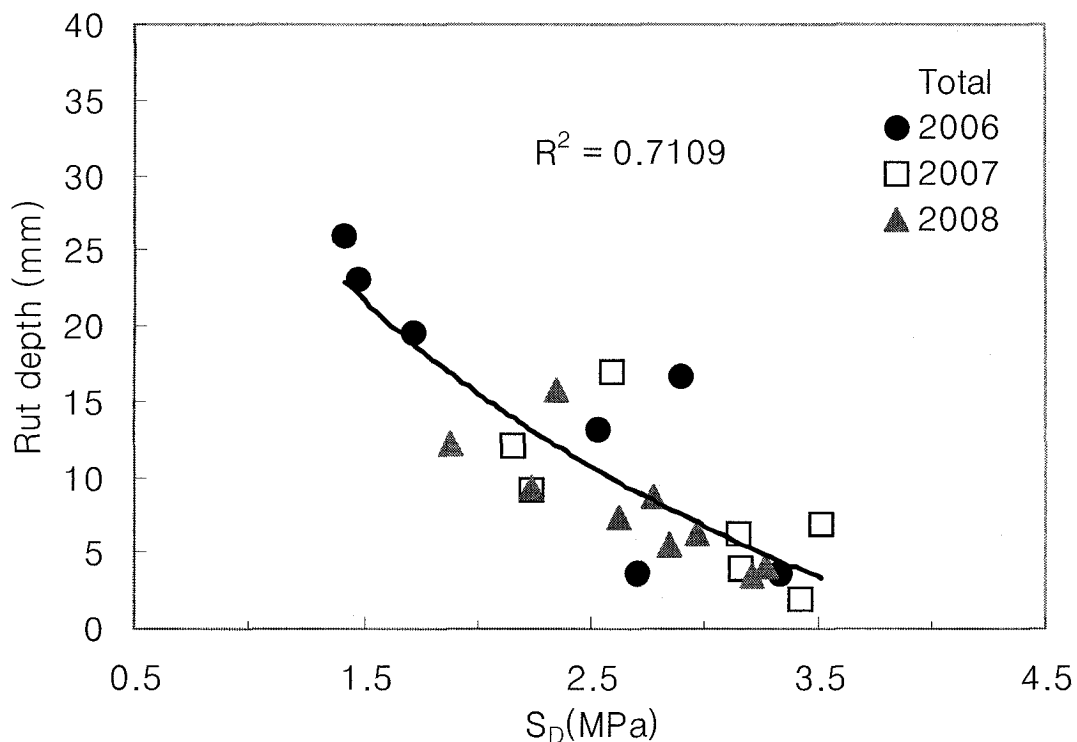


그림 3.42. 3년간 측정된 현장소성변형 깊이와 변형강도 측정치와의 상관성 분석

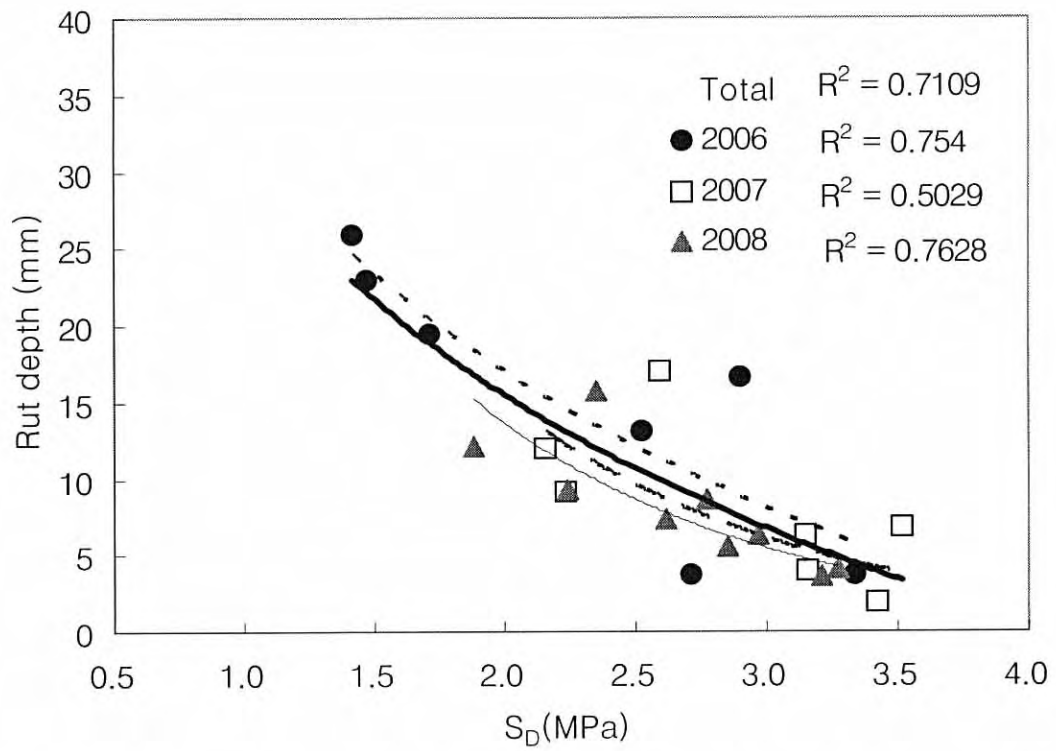


그림 3.43. 연도별로 측정한 소성변형 깊이와 변형강도의 상관성 분석

그림 3.44 ~ 그림 3.49는 3차 년도에 일부 구간에서 코어를 채취하는 모습을 보여주는 사진이다.



그림 3.44 현진에버빌 앞 (홍천방향) 코어채취



그림 3.45 안디옥 교회 앞 (홍천방향) 코어채취

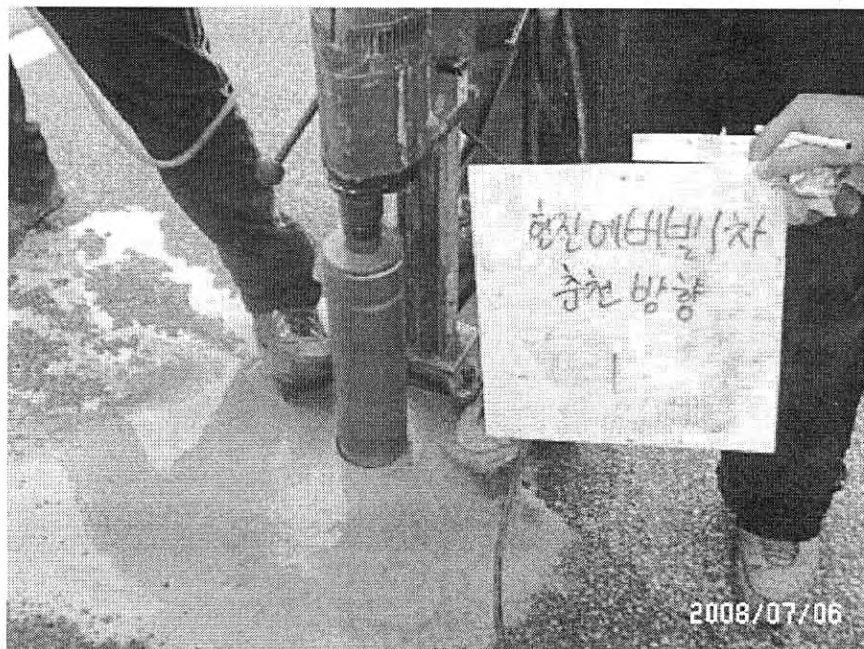


그림 3.46 춘천에버빌 앞 (춘천방향) 코어채취



그림 3.47 춘천시 신매리 농협 앞 코어채취



그림 3.48 춘천시 서면 앞 (금산2리 방향) 코어채취

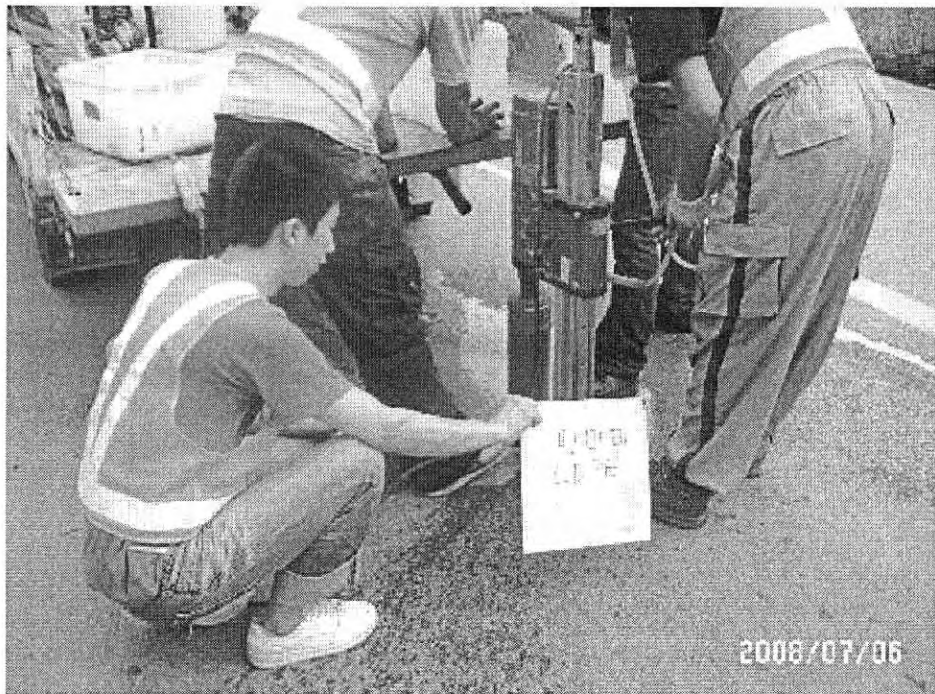


그림 3.49 춘천시 팔미리 코어채취

그림 3.50 ~ 그림 3.52는 3차 년도에 경상북도 칠곡군에 시험포장한 사진이다. 그리고 표 3.21은 시험 포설된 혼합물들의 변형강도 특성을 보여준다. 그리고 표 3.22는 포설된 혼합물에 대한 실험실에서 휠트래킹 장비를 이용하여 반복주행에 따른 소성변형 특성을 나타내고 그림 3.53은 혼합물들의 반복주행결과를 보여준다. 표 3.22에서 개질아스팔트 혼합물이 일반아스팔트 혼합물보다 높은 변형강도를 보였는데 표 3.22에서나 그림 3.53에서도 개질아스팔트 혼합물이 일반아스팔트 혼합물의 소성변형 저항성이 높게 나타났다. 이것은 변형강도가 혼합물의 소성변형을 잘 대변하는 것을 의미한다.



그림 3.50. 경북 칠곡군 일반아스팔트 혼합물 시험포설



그림 3.51. 경북 칠곡군 L4E10 혼합물 시험포설



그림 3.52. 경북 칠곡군 RLDPE 혼합물 시험포설

표 3.21 시험 포설된 혼합물의 변형강도 특성

혼합물	번호	공극(%)	P(N)	y(mm)	S _D (MPa)
RLDPE5	1	2.20	4422	2.6	5.050
	2	2.51	5037	2.7	5.660
	3	2.79	4272	3.1	4.598
	평균	2.50	4577	2.8	5.103
L4E10	1	2.12	4056	1.9	5.103
	2	2.55	3732	2.9	4.085
	3	2.70	3909	2.6	4.430
	평균	2.45	3899	2.5	4.548
AP-5	1	2.52	4356	4.1	4.238
	2	2.86	3546	3.2	3.755
	3	2.53	4374	3.2	4.637
	평균	2.64	4092	3.5	4.210

표 3.22 시험 포설된 혼합물의 소성변형 특성

혼합물	공극(%)	동적안정도(pass/mm)		Rut depth(mm)
		DS _{ks}	DS _{new}	
RLDPE5	3.73	6632	5753	2.34
L4E10	3.51	5727	4162	3.24
AP-5	3.84	2520	3393	4.29

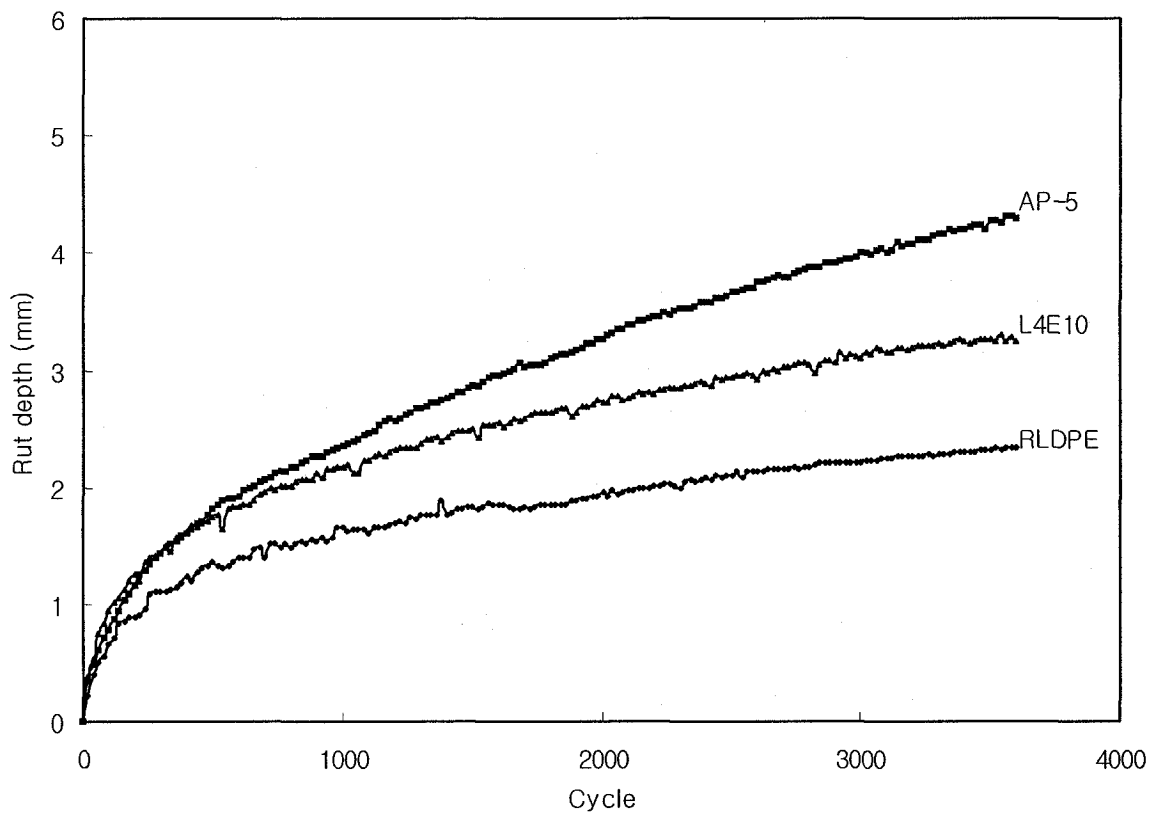


그림 3.53. 시험 포설된 혼합물의 반복주행결과

7. 현장원형모의주행 시험

현장원형모의주행시험기(Field circular wheel tracker: FCWT)용 시험 피트는 그림 3.54, 3.55, 3.56과 같이 8구간으로 구분하여 각기 다른 13mm 및 19mm 표층 밀립도 혼합물과 10mm와 13mm의 밀입도 및 배수성 혼합물을 포설하였다. 또한 최초로 만들어진 현장원형모의주행시험기에 한 대를 추가하여 보다 많은 혼합물의 실험을 수행할 수 있었다. 한 FCWT당 8각으로 표층 깊이만큼을 파내고 각 각호 구간에 한 가지씩 다른 혼합물을 포설 할 수 있도록 해 놓았다. 1차 시험에서는 그림 3.54와 같이 4가지 밀입도 혼합물을 마주보도록 2곳에 포설하고 침하깊이를 측정하여 평균을 사용하였다. 그림 3.55는 2차 시험에서 8곳에 각기 다른 밀립도 혼합물을 포설한 모식도이다. 그리고 3차 시험에서는 그림 3.56에서와 같이 8곳에 각각 다른 10mm와 13mm 밀립도 및 배수성 표층 혼합물을 포설하고 침하깊이를 측정하였다.

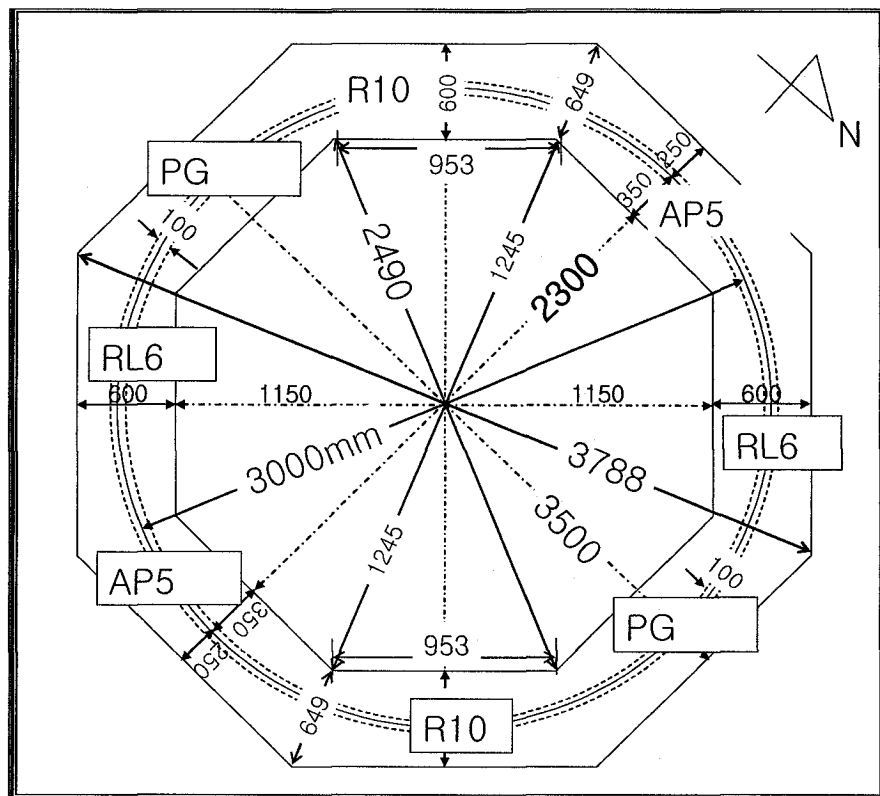


그림 3.54. 08년 1차 현장원형주행 시험기에 포설된 표층 혼합물

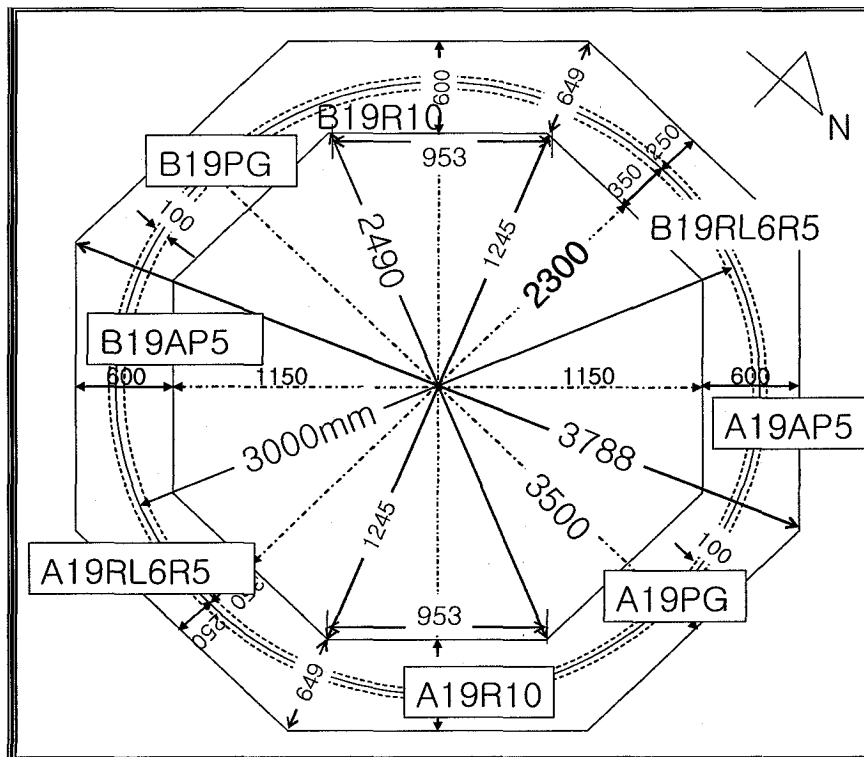


그림 3.55. 08년 2차 현장원형주행 시험기에 포설된 표층 혼합물

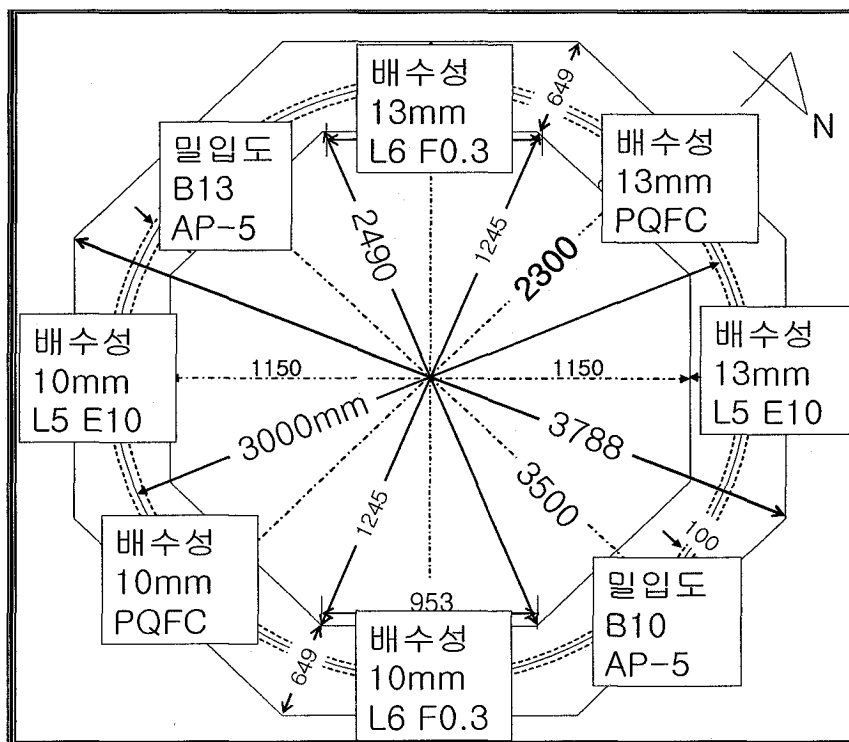


그림 3.56. 08년 3차 현장원형주행 시험기에 포설된 표층 혼합물

그림 3.57은 1차 FCWT 시험피트에 13mm 화강암 밀입도 표층 혼합물을 포설하고 FCWT를 가동하여 침하깊이를 측정한 결과를 보여준다. 바퀴 주행로를 따라 각 혼합물을 포설하고 FCWT를 가동하여 침하깊이를 측정하고 각 구간에 포설한 포장상태 혼합물의 변형강도를 측정하기 위하여 주행로 바로 옆 부위에서 코어를 채취하였다.

그림 3.57에서 보듯이 혼합물은 종류별로 그 차이가 확연히 나타나지만 점들의 위치가 고르지 못한 것을 알 수 있다. 이는 5월 중순부터 시작한 시험에서 일기에 따른 온도변화가 큰 요인으로 판단된다. 특히 포장표면 온도가 40°C를 미치지 못하는 경우 팬히터를 축에 설치하고 표면 가열을 하며 주행하였으나 여전히 시험시의 온도를 시험기간 내내 일정하게 조절하기가 어려웠다.

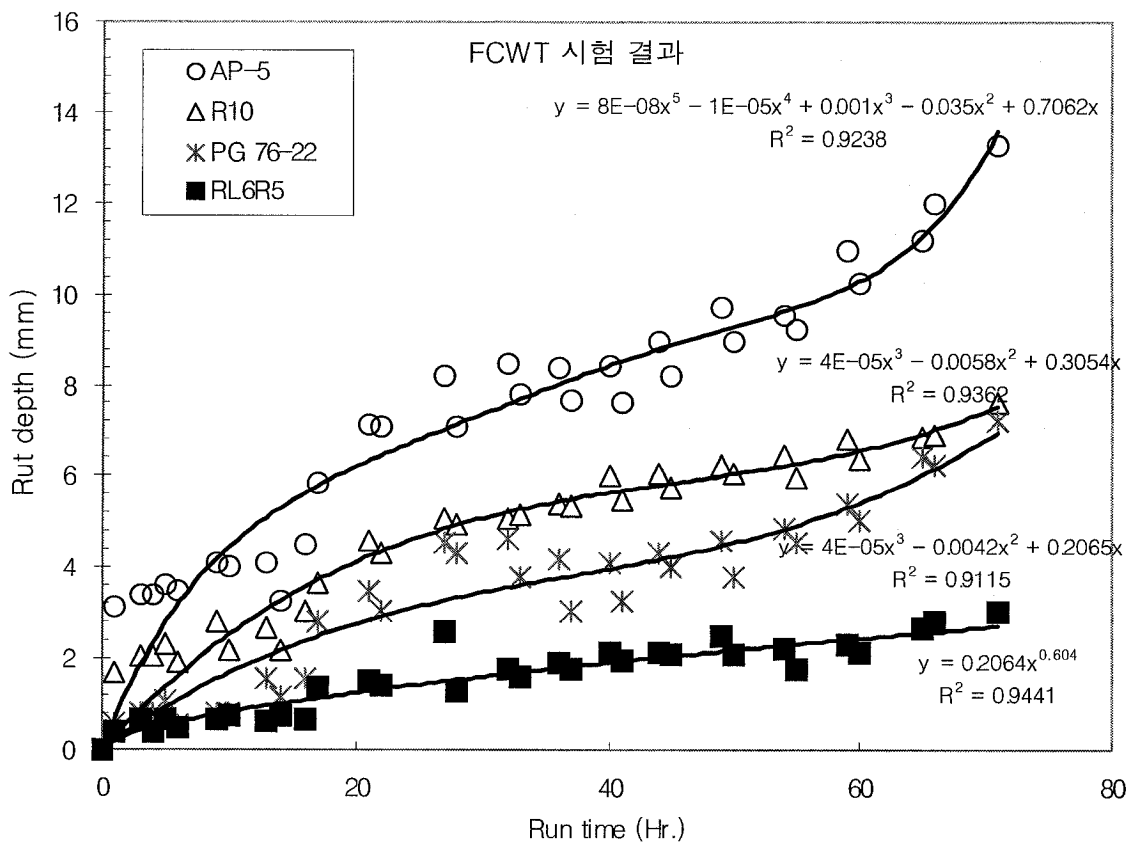


그림 3.57. 1차 현장원형주행시험기의 침하깊이 측정 결과

그림 3.57에서 바인더 별 침하깊이는 RL6R5에서 가장 낮게 발생한 것을 알 수 있고 그다음 PG76-22, R10, AP5 순으로 침하깊이를 나타내고 있다. 현장모의주행시험기의 최종 침하깊이를 포설당시 혼합물 및 코어 공시체 혼합물의 변형강도와 함께 표 3.23에 나타내었다. 그리고 침하깊이와 제조 공시체 변형강도와 주행 후에 궤적 옆에서 채취한 코어 공시체의 변형강도의 상관관계를 그림 3.58, 3.59에 각각 나타내었다. 그림에서 보듯이 두 변수간의 상관관계는 매우 양호하여 $R^2 > 0.8$ 이상으로 나타났다.

즉, 포설할 당시의 혼합물 샘플의 변형강도 및 코어 공시체의 변형강도가 높고 낮음에 따라 FCWT 시험에서 침하깊이가 낮고 높게 소성변형 저항성에 분명한 차이가 나타남을 다시 확인할 수 있었다. 이를 통해 혼합물의 변형강도가 높으면 실제 도로에서도 침하깊이가 낮게 나타날 가능성이 매우 높음을 확인하였다. 따라서 변형강도가 일정수준 이상 높게 배합설계를 통해 제어하면 소성변형에 강한 혼합물을 현장에 사용하게 될 수 있음을 알 수 있다.

표 3.23. 1차 FCWT의 화강암 13mm 혼합물의 변형강도와
최종 침하깊이와의 관계

혼합물	시험실 다짐 공시체		코어 공시체		Final Rut depth(mm)
	공극률(%)	S _D (MPa)	공극률(%)	S _D (MPa)	
AP5	4.02	3.21	4.73	1.929	13.29
R10	3.79	3.48	3.50	2.773	7.60
PG76	4.13	4.25	4.43	3.154	7.20
RL6R5	3.88	4.65	3.62	3.507	3.01

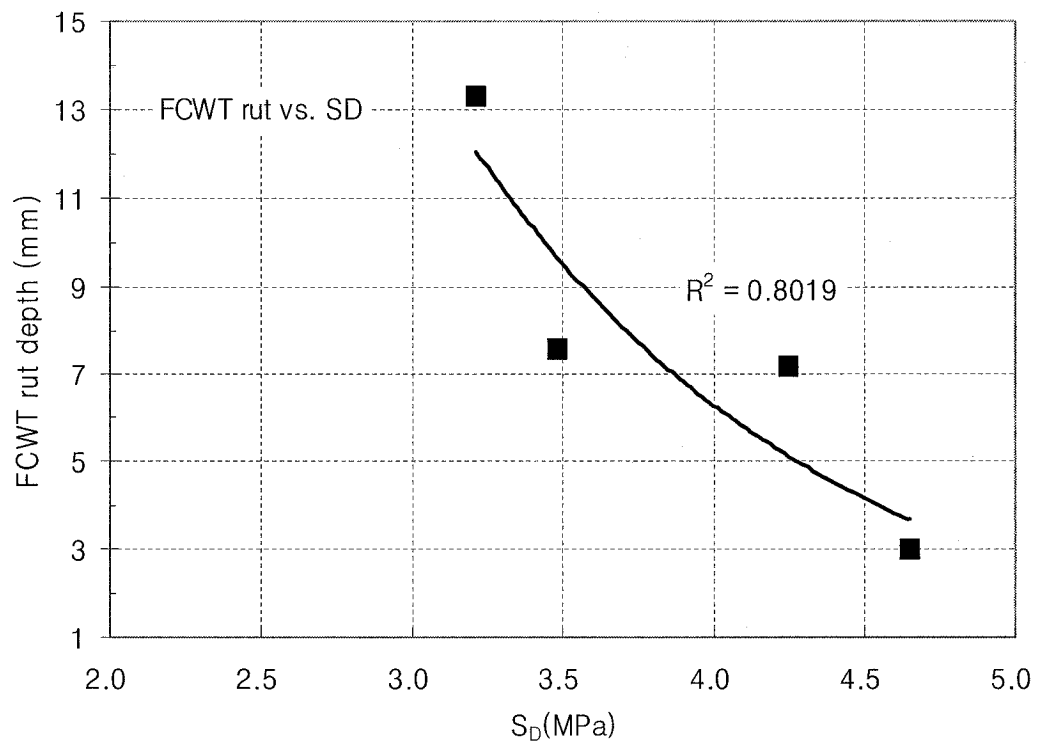


그림 3.58. FCWT 시험에서 rut depth와 실험실 공시체 S_D 의 관계

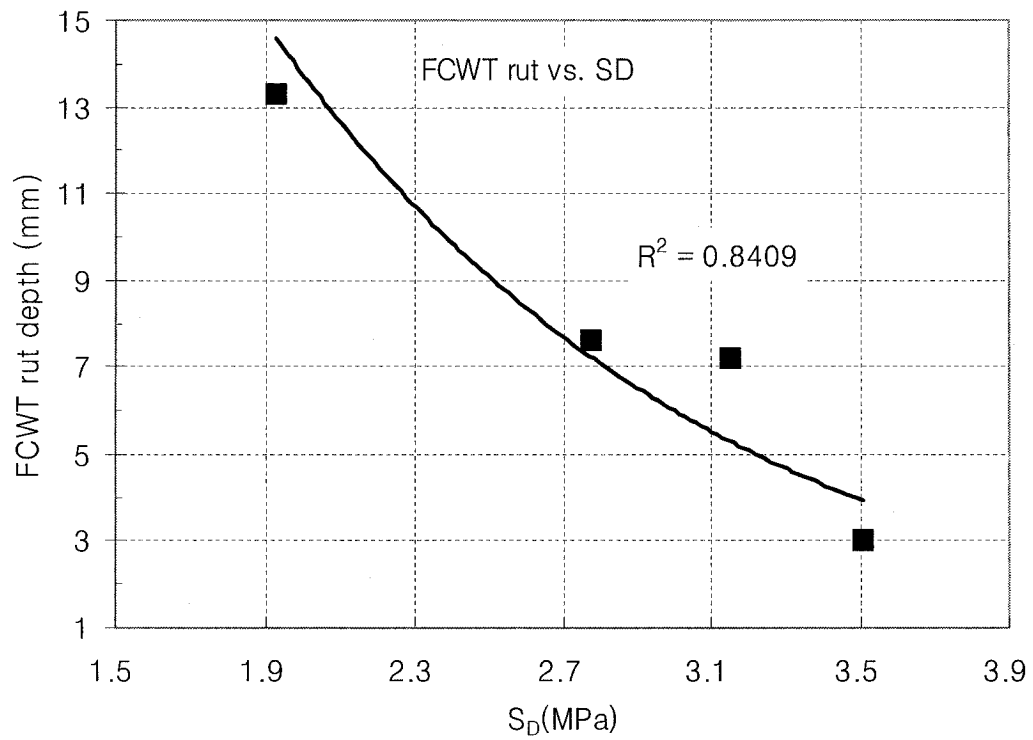


그림 3.59. FCWT 시험에서 rut depth와 코어 공시체 S_D 의 관계

그림 3.60은 두 번째 현장원형모의주행시험피트에 19mm 편마암 밀입도 표층 혼합물을 포설하고 현장원형모의주행시험을 수행한 결과를 보여준다. 그림 3.55와 같이 8각 바퀴 주행로를 따라 각 혼합물을 포설하고 시험기 주행 회수에 따른 침하깊이를 혼합물 별로 측정하였다. 포설당시 샘플 혼합물로 제조한 공시체의 변형강도와 침하깊이 측정 부위 옆에서 채취한 코어 변형 강도와 FCWT 시험 결과와의 상관성을 평가하였다.

그림에서 보듯이 1차 시험에서와 마찬가지로 혼합물은 종류별로 그 차이가 확연히 나타나지만 점들의 위치가 일정하지 못한 것을 알 수 있다. 이는 일기에 따른 온도변화가 큰 요인으로 판단된다. 특히 포장표면 온도가 40°C를 미치지 못하는 경우 표면 가열 장치를 사용하며 주행하였으나 여전히 시험시의 온도 조절이 어려웠다.

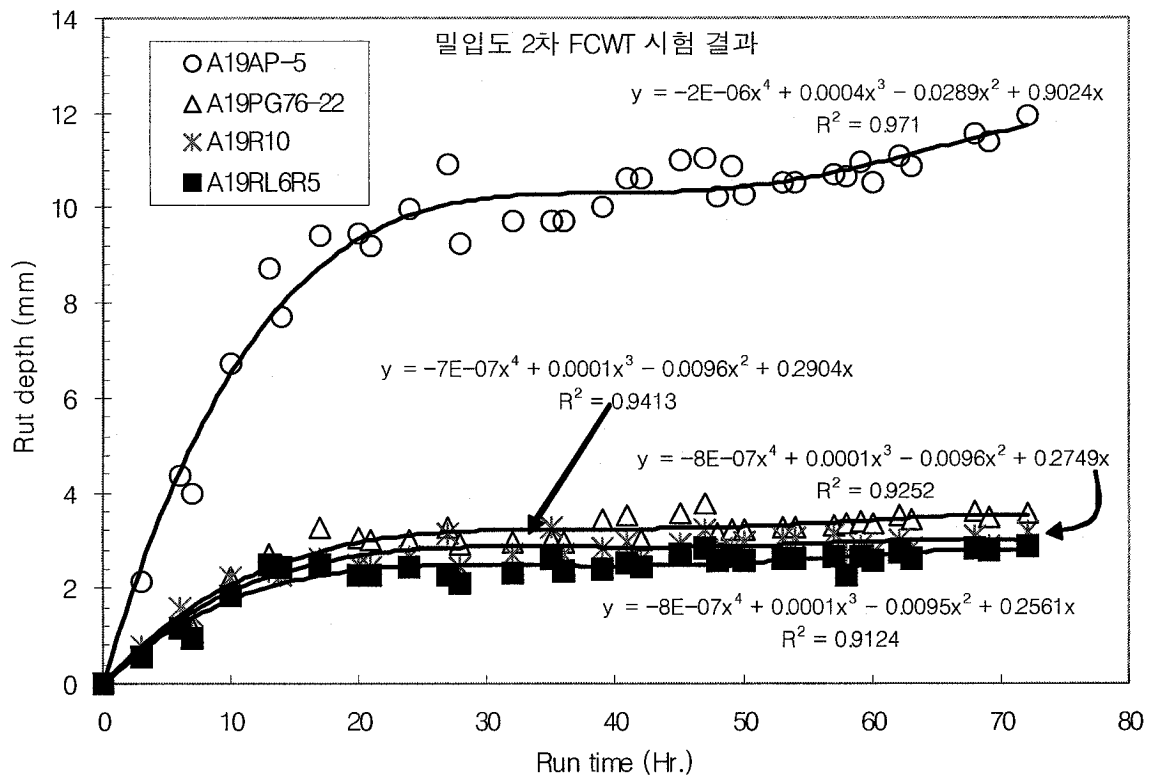


그림 3.60. 2차 현장원형주행시험기 편마암 19mm의 침하깊이 측정 결과

그림 3.60에서 바인더 별 침하깊이는 A19RL6R5에서 가장 낮은 침하깊이가 발생하였고 그다음 A19R10, A19PG76-22, A19AP-5 순으로 침하깊이를 나타내고 있다. 현장모의주행시험기의 최종 침하깊이를 포설당시 혼합물 및 코어 공시체 혼합물의 변형강도와 함께 표 3.24에 나타내었다.

그리고 침하깊이와 제조 공시체 변형강도와 주행 후에 궤적 옆에서 채취한 코어 공시체의 변형강도의 상관관계를 그림 3.61, 3.62에 각각 나타내었다. 그림에서 보듯이 두 변수간의 상관관계는 매우 양호하여 $R^2 > 0.8$ 이상으로 나타났다. 그림에서 보듯이 두 변수간의 상관관계는 실험실 다짐공시체의 경우 양호한 편이나 코어공시체는 낮은 것으로 나타났다. 이것은 그림 3.61, 3.62에서 보듯이 일반아스팔트 바인더를 사용한 19AP-5의 혼합물이 예상 보다 너무 침하가 크게 발생했기 때문으로 판단된다.

표 3.24. FCWT에 사용된 편마암 19mm의 변형강도와 최종침하깊이와의 관계

혼합물	실험실 다짐 공시체		코어 공시체		Final Rut depth(mm)
	공극률(%)	S _D (MPa)	공극률(%)	S _D (MPa)	
A19AP-5	4.05	3.286	2.97	2.809	11.96
A19PG76-22	3.90	4.419	2.55	4.297	3.54
A19R10	4.51	3.886	1.84	3.297	3.15
A19RL6R5	4.57	4.074	1.73	3.635	2.86

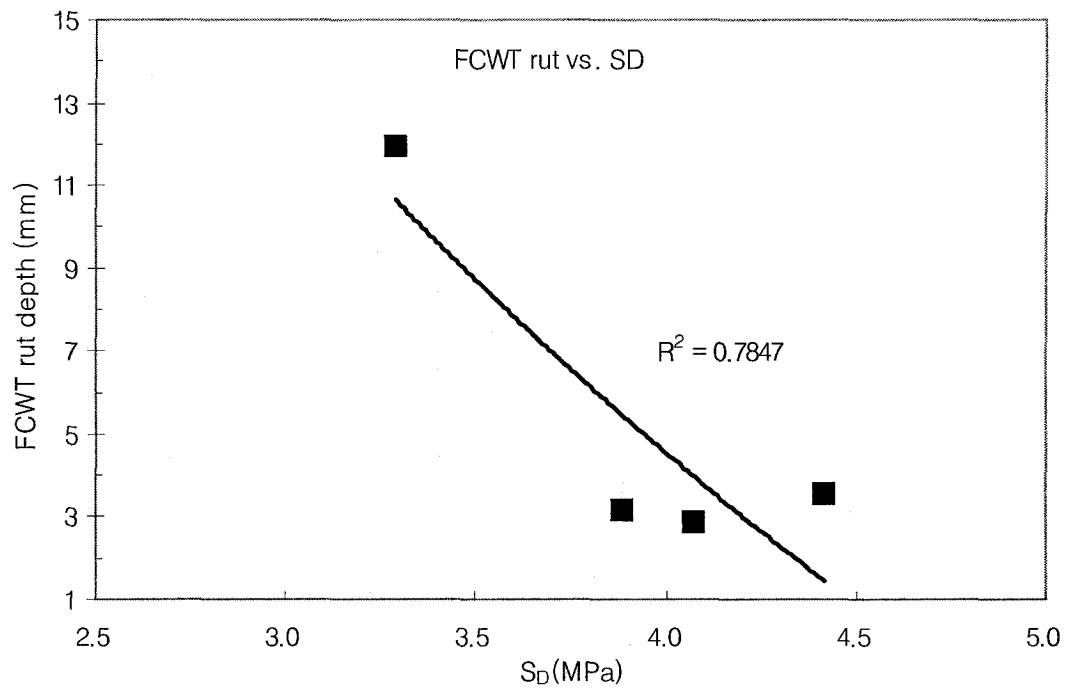


그림 3.61. 편마암 19mm FCWT 시험의 rut depth와 실험실 공시체 S_D 의 관계

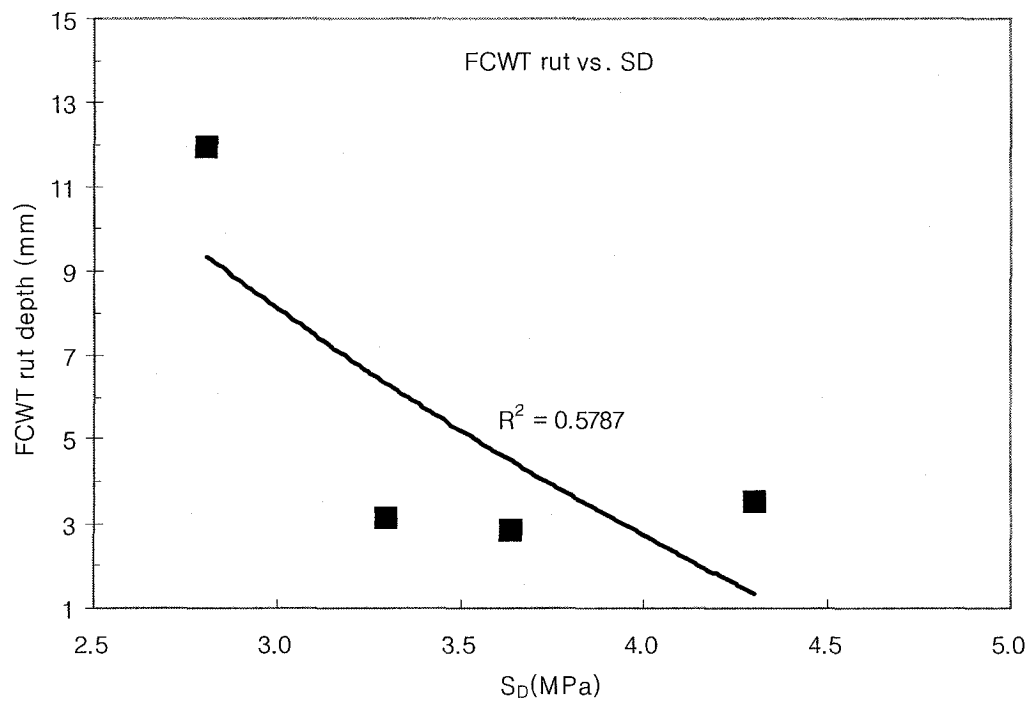


그림 3.62. 편마암 19mm FCWT 시험에서 rut depth와 코어 공시체 S_D 의 관계

그림 3.63은 2차 현장원형모의주행시험피트에 19mm 편마암 밀입도 표층 혼합물을 포설하고 현장원형모의주행시험을 수행한 결과를 보여준다. 그림 3.56과 같이 8각 바퀴 주행로를 따라 각 혼합물을 포설하고 시험기 주행 회수에 따른 침하깊이를 혼합물 별로 측정하였다. 포설당시 샘플 혼합물로 제조한 공시체의 변형강도와 침하깊이 측정 부위 옆에서 채취한 코어 변형강도와 FCWT 시험 결과와의 상관성을 평가하였다.

그림 3.63에서 보듯이 혼합물은 종류별로 그 차이가 확연히 나타나지만 점들의 위치가 고르지 못한 것을 알 수 있다. 이는 5월 중순부터 시작한 시험에서 일기에 따른 온도변화가 큰 요인으로 판단된다. 특히 포장표면 온도가 40°C를 미치지 못하는 경우 팬히터를 축에 설치하고 표면 가열을 하며 주행하였으나 여전히 시험시의 온도를 시험기간 내내 일정하게 조절하기가 어려웠다.

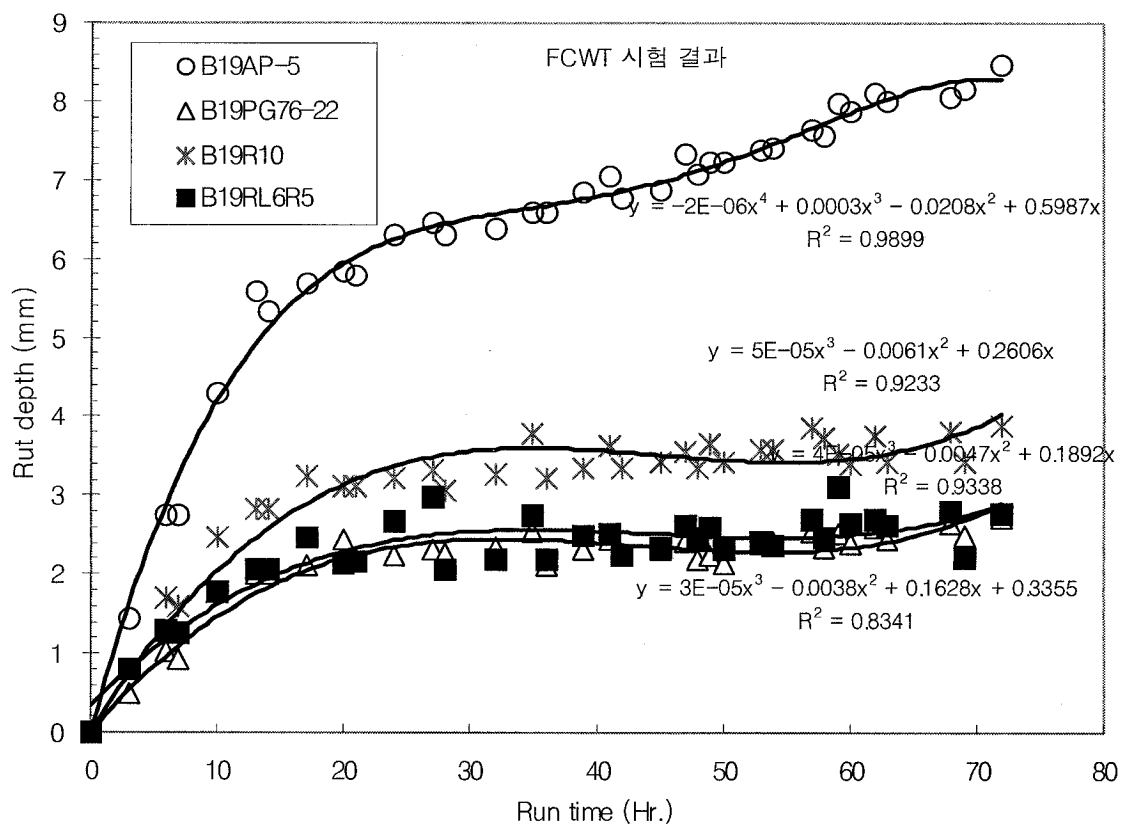


그림 3.63. 2차 현장원형주행시험기 화강암 19mm의 침하깊이 측정 결과

그림 3.63에서 바인더 별 침하깊이는 B19PG76-22와 B19RL6R5가 2.7mm 정도로 매우 적은 침하깊이가 발생했으며 그다음 B19R10, B19AP-5 순으로 침하깊이를 나타내고 있다. 현장모의주행시험기의 최종 침하깊이를 포설당시 혼합물 및 코어 공시체 혼합물의 변형강도와 함께 표 3.25에 나타내었다.

그리고 침하깊이와 제조 공시체 변형강도와 주행 후에 궤적 옆에서 채취한 코어 공시체의 변형강도의 상관관계를 그림 3.64, 3.65에 각각 나타내었다. 그림에서 보듯이 두 변수간의 상관관계는 매우 양호하여 $R^2 > 0.82$, $R^2 > 0.74$ 이상으로 나타났으며 실험실 다짐공시체의 경우 보다 좋은 편이나 코어공시체는 양호하지만 다소 낮은 것으로 나타났다. 이것은 실험실 공시체가 품질 관리가 더 잘되나 코어는 현장다짐의 변수 때문에 그림 3.63에서 보듯이 일반아스팔트 바인더를 사용한 B19AP-5의 혼합물이 예상 보다 큰 침하가 발생했기 때문으로 판단된다.

표 3.25. 화강암 19mm의 FCWT 시험의 변형강도와 최종침하깊이와의 관계

혼합물	실험실 다짐 공시체		코어 공시체		Final Rut depth(mm)
	공극률(%)	S _D (MPa)	공극률(%)	S _D (MPa)	
B19AP-5	3.98	3.223	3.47	3.009	8.465
B19PG76-22	4.44	4.717	2.68	3.667	2.715
B19R10	4.63	3.598	1.55	3.105	3.880
B19RL6R5	4.73	4.261	5.02	3.719	2.785

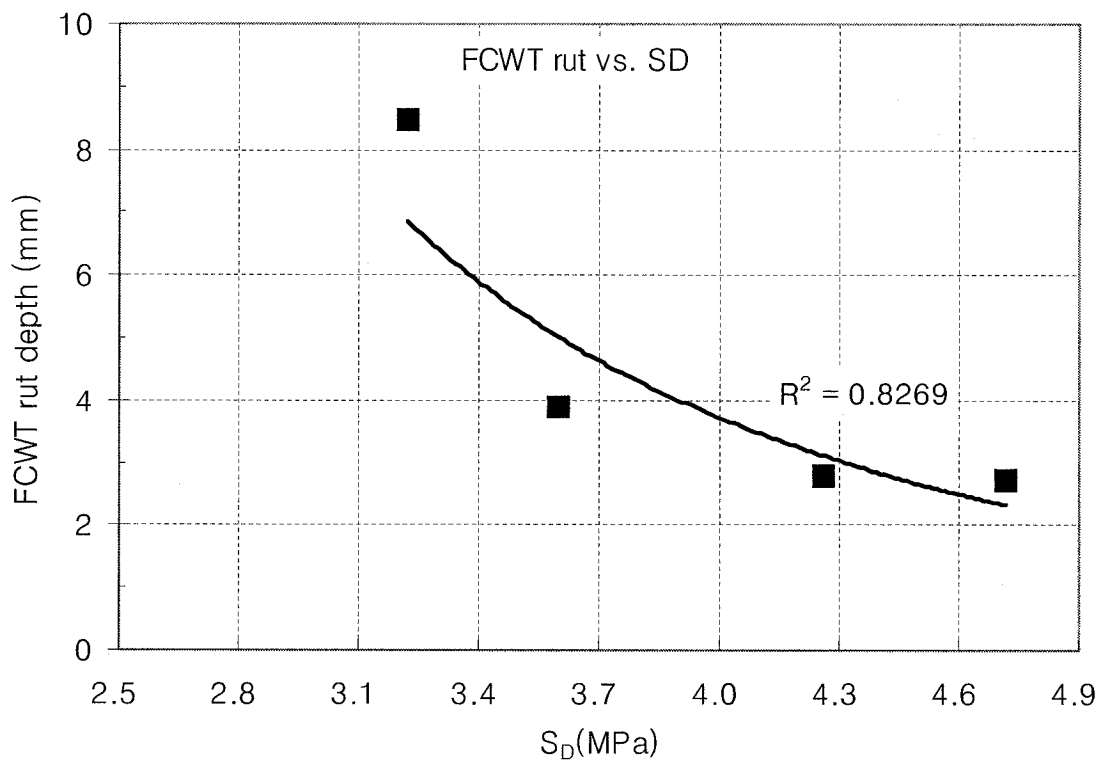


그림 3.64. 화강암 19mm의 FCWT 시험 rut depth와 실험실 공시체 S_D 의 관계

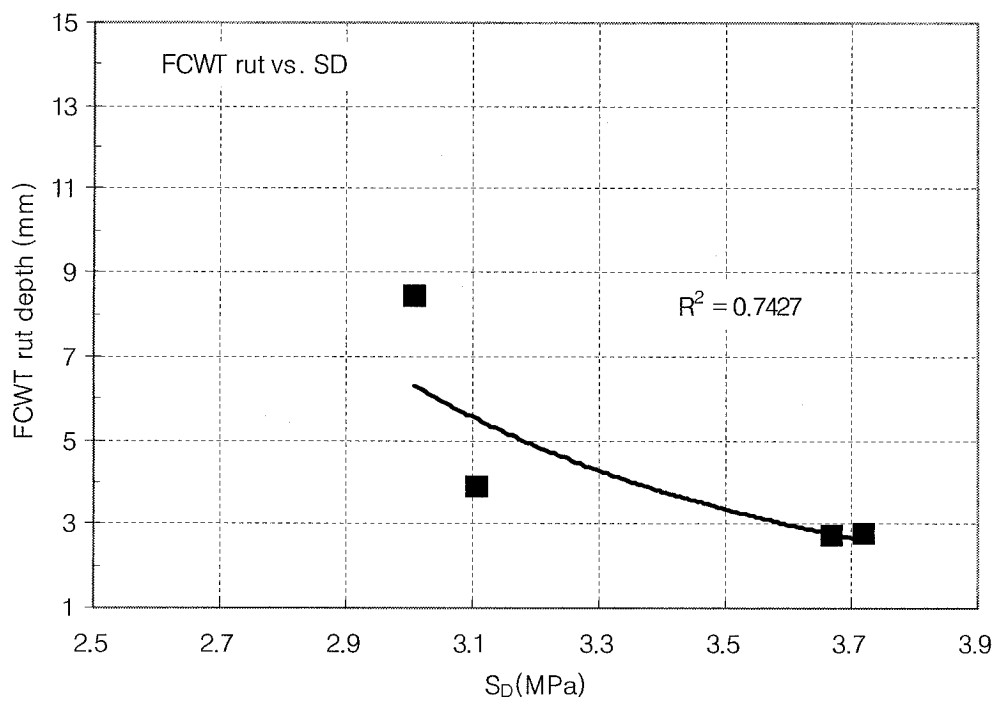


그림 3.65. 화강암 19mm FCWT 시험에서 rut depth와 코어 공시체 S_D 의 관계

그림 3.66은 3차 현장원형모의주행시험피트에 13mm 편마암 밀입도 표층 혼합물과 13mm 화강암 배수성 표층 혼합물을 포설하고 FCWT 시험을 수행한 결과를 보여준다. 그림 3.56과 같이 8각 바퀴 주행로를 따라 각 혼합물을 포설하고 시험기 주행 회수에 따른 침하깊이를 혼합물 별로 측정하였다. 포설당시 샘플 혼합물로 제조한 공시체의 변형강도와 침하깊이 측정 부위 옆에서 채취한 코어 변형강도와 FCWT 시험 결과와의 상관성을 평가하였다.

그림 3.63에서 보듯이 1차와 2차에서와 마찬가지로 혼합물은 종류별로 그 차이가 확연히 나타나지만 점들의 위치가 고르지 못한 것을 알 수 있다. 이는 5월 중순부터 시작한 시험에서 일기에 따른 온도변화가 큰 요인으로 판단된다. 특히 포장표면 온도가 40°C를 미치지 못하는 경우 팬히터를 측에 설치하고 표면 가열을 하며 주행하였으나 여전히 시험시의 온도를 시험기간 내내 일정하게 조절하기가 어려웠기 때문이다.

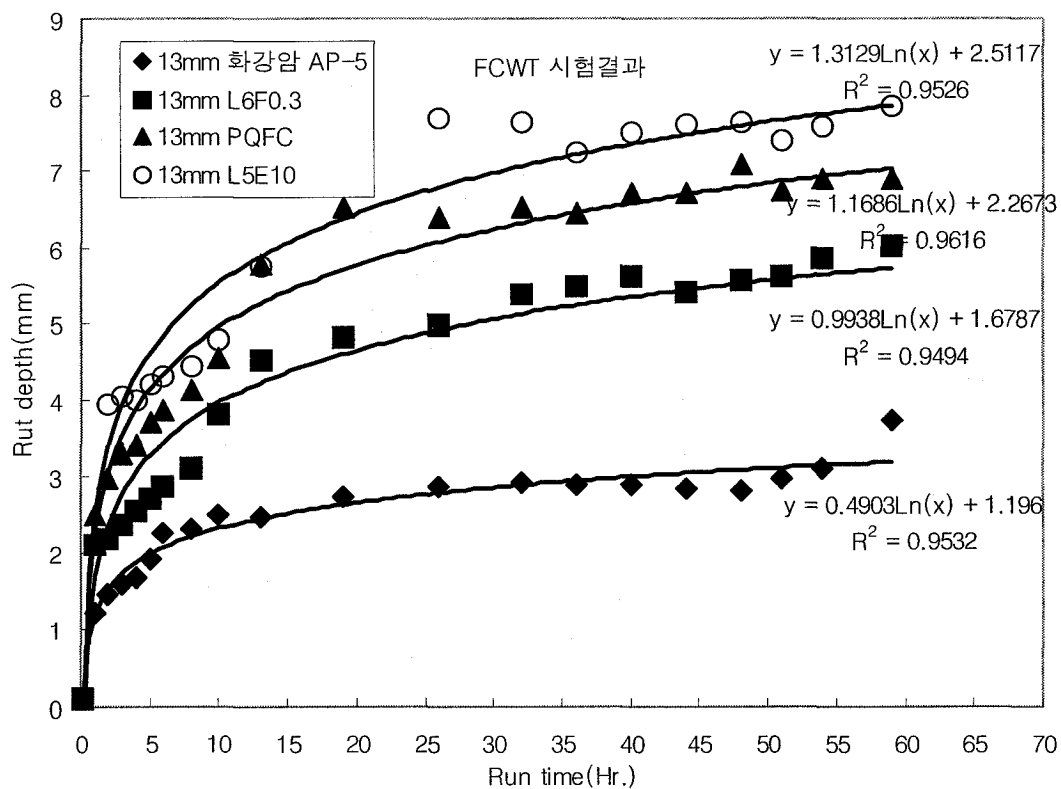


그림 3.66. 3차 FCWT의 13mm 밀입도와 배수성 혼합물의 침하깊이 측정 결과

그림 3.66에서 바인더 별 침하깊이는 일반아스팔트 바인더의 13mm 확장압 밀립도 AP-5가 배수성 혼합물보다 가장 낮은 침하깊이가 발생한 것을 알 수 있고, 13mm 배수성 혼합물은 L6F0.3이 가장 낮고 그 다음 PQFC, L5E10 순으로 침하깊이를 나타내고 있다. 현장원형모의주행시험기의 최종 침하깊이를 포설할 시 혼합물의 변형강도와 함께 표 3.26에 나타내었다. 그리고 침하깊이와 포설할 시 및 현장원형모의주행시험기의 최종 침하깊이 측정 후 포설할 시 혼합물 및 코어의 변형강도의 상관관계를 각각 그림 3.67과 68에 나타내었다. 그림 3.67에서 보듯이 두 변수간의 상관관계는 양호($R^2 > 0.77$)하게 나타났다. 그림 3.68에서는 코어의 변형강도와 최종침하깊이와의 상관관계도 우수한 $R^2 > 0.91$ 이었다.

하지만 이는 회귀분석에 밀입도를 포함시킨 것이며 이 밀입도 데이터 포인트가 R^2 에 큰 영향을 미친것이다. 배수성 혼합물만으로 회귀분석을 하는 경우 실험실 공시체의 경우 $R^2 < 0.1$ 이고, 코어공시체의 경우 $R^2 > 0.55$ 로 어느 정도 상관성을 보인다. 하지만 이도 그리 높은 상관관계는 아니므로 배수성 혼합물의 포설할 당시의 혼합물의 변형강도에 따라 FCWT 시험에서 배수성 혼합물의 소성변형 저항성에 차이를 확인하기가 어려운 것으로 판단된다. 즉, 배수성 혼합물의 배합설계에 변형강도의 사용은 더 많은 연구가 추가되어야 할 것으로 판단된다. 참고적으로 현재 사용되어 지고 있는 마샬 배합방법도 배수성 혼합물의 배합설계에 적용이 되지 못하고 있다.

표 3.26. 3차 FCWT의 13mm 밀입도와 배수성 혼합물의 변형강도와 최종 침하깊이와의 관계

혼합물	실험실 다짐 공시체		코어 공시체		Final Rut depth(mm)
	공극률(%)	S _D (MPa)	공극률(%)	S _D (MPa)	
밀입도AP-5	3.94	3.627	8.33	1.673	3.73
L6 F0.3	23.97	1.038	14.99	0.828	6.01
PQFC	22.23	1.798	23.07	0.392	6.88
L5 E10	22.68	0.89	18.45	0.470	7.86

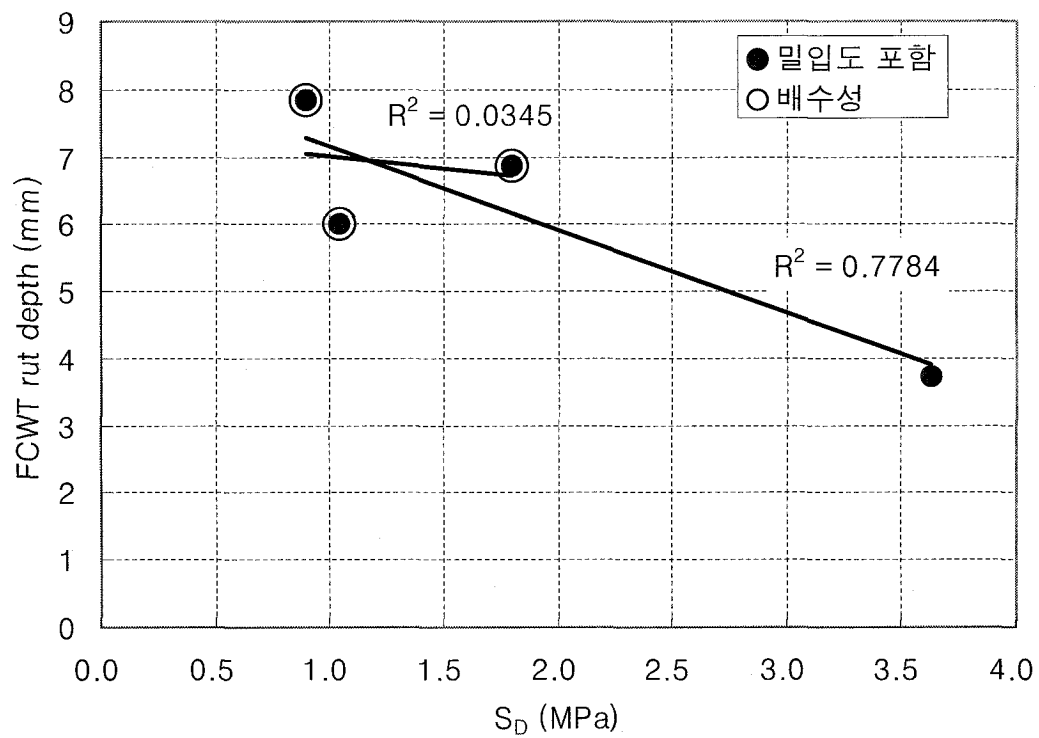


그림 3.67. 배수성 13mm FCWT rut depth와 실험실 공시체 S_D 와의 관계

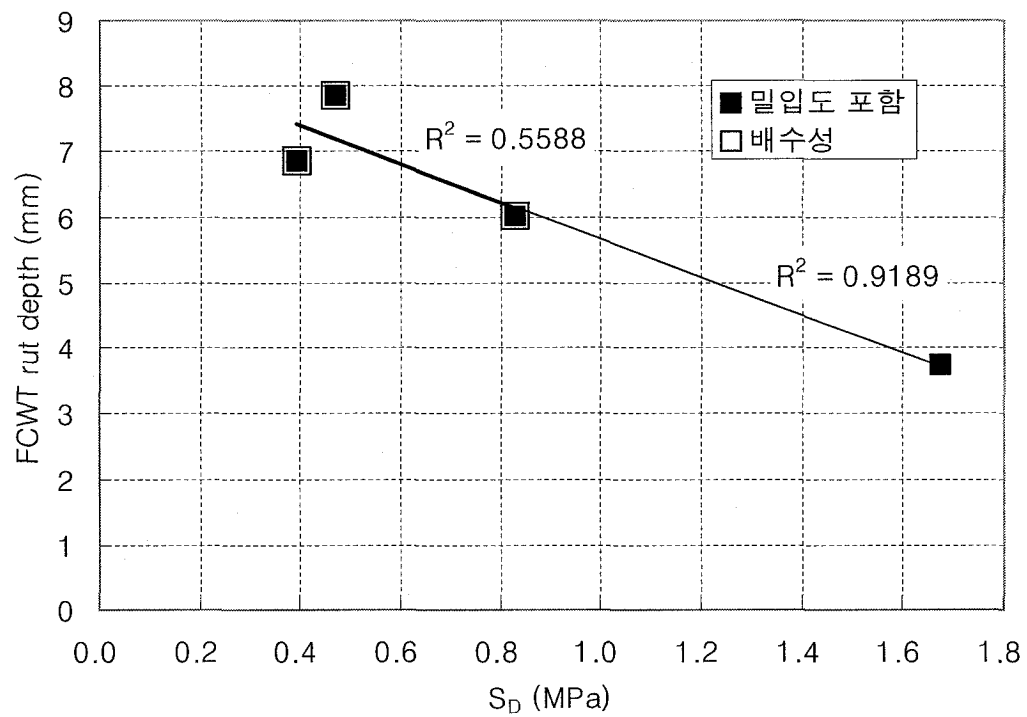


그림 3.68. 배수성 13mm FCWT 시험에서 rut depth와 코어 공시체 S_D 의 관계

그림 3.69는 3차 현장원형모의주행시험피트에 10mm 편마암 밀입도 표층 혼합물과 10mm 화강암 배수성 표층 혼합물을 포설하고 FCWT 시험을 수행한 결과를 보여준다. 그림 3.56과 같이 8각 바퀴 주행로를 따라 각 혼합물을 포설하고 시험기 주행 회수에 따른 침하깊이를 혼합물 별로 측정하였다. 포설당시 샘플 혼합물로 제조한 공시체의 변형강도와 침하깊이 측정 부위 옆에서 채취한 코어 변형강도와 FCWT 시험 결과와의 상관성을 평가하였다.

그림 3.69에서 보듯이 1차와 2차에서와 마찬가지로 혼합물은 종류별로 그 차이가 확연히 나타나지만 점들의 위치가 고르지 못한 것을 알 수 있다. 이는 하절기 이전에 시작한 시험에서 일기에 따른 온도변화가 큰 요인으로 판단된다. 특히 포장표면 온도가 40°C를 미치지 못하는 경우 팬히터를 축에 설치하고 표면 가열을 하며 주행하였으나 여전히 시험시의 온도를 시험기간 내내 일정하게 조절하기가 어려웠기 때문이다.

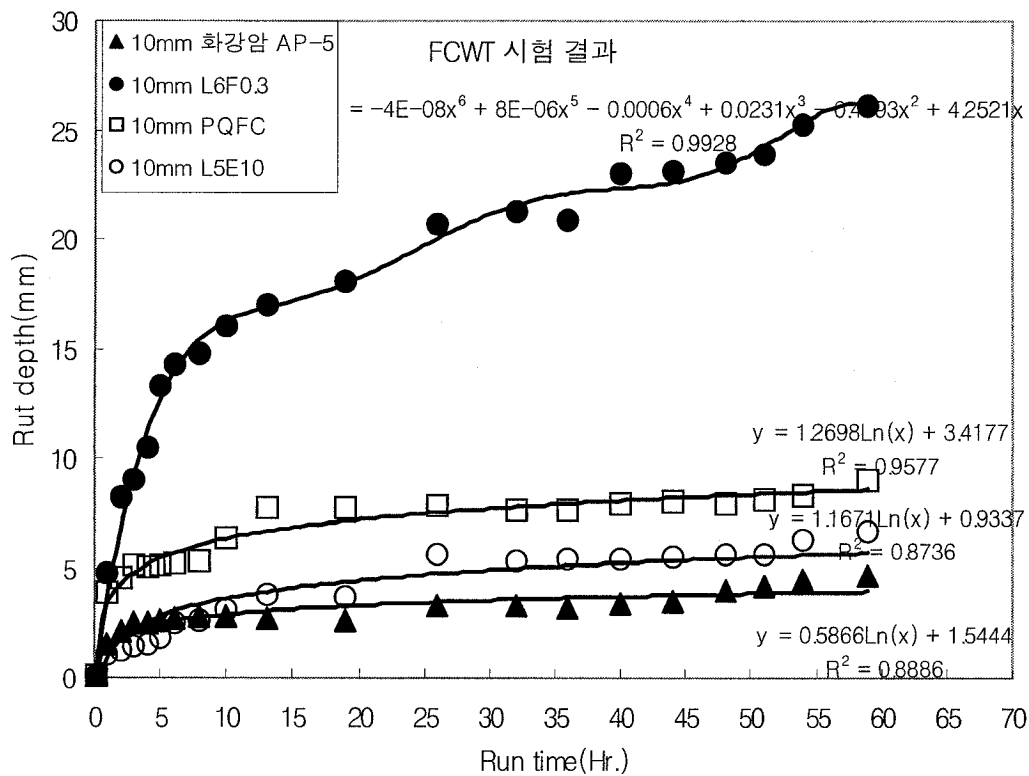


그림 3.69. 3차 FCWT 시험의 10mm 밀입도와 배수성 혼합물의 침하깊이 측정 결과

그림 3.69에서 바인더 별 침하깊이는 일반아스팔트 바인더의 10mm 화강암 밀입도 AP-5가 배수성 혼합물보다 가장 낮은 침하깊이가 발생한 것을 알 수 있고, 10mm 배수성 혼합물은 L5E10이 가장 낮고 그 다음 PQFC, L6F0.3 순으로 침하깊이를 나타내고 있다. 10mm L6F0.3 배수성 혼합물이 침하깊이를 아주 크게 나타냈는데, 이 이유는 포설 당시 혼합물의 다짐 불량으로 기인된다. 현장원형모의주행시험기의 최종 침하깊이를 포설할 시 혼합물의 변형강도와 함께 표 3.27에 나타내었다. 그리고 침하깊이와 포설할 시 및 현장원형모의주행시험기의 최종 침하깊이 측정 후 포설할 시 혼합물 및 코어의 변형강도의 상관관계를 각각 그림 3.70과 3.71에 나타내었다. 그림 3.70에서 보듯이 두 변수간의 상관관계는 아주 낮게 나타났다.

따라서 배수성 혼합물의 포설할 당시의 혼합물의 변형강도에 따라 FCWT 시험에서 배수성 혼합물의 소성변형 저항성에 차이를 확인할 수 없는 것으로 판단된다. 더구나, 배수성 혼합물의 변형강도는 그 값 자체가 너무 낮고 또한 코어채취 시 수압의 영향 등으로 코어 변형강도는 더 낮아져 설사 rut depth와 상관관계가 다소 나타난다 해도 (그림 3.68이나 3.71에서 처럼) 큰 의미를 부여하기 힘들어 배합설계에 변형강도의 사용은 더 많은 연구가 추가되어야 할 것으로 판단된다.

표 3.27. 3차 FCWT 시험의 10mm 밀입도와 배수성 혼합물의 변형강도와 최종 침하깊이와의 관계

혼합물	시험실 다짐 공시체		코어 공시체		Final Rut depth(mm)
	공극률(%)	S _D (MPa)	공극률(%)	S _D (MPa)	
밀입도AP-5	4.10	3.280	5.98	1.442	4.67
L6 F0.3	23.75	0.822	21.08	0.327	26.16
PQFC	24.24	1.044	23.58	0.311	9.04
L5 E10	23.24	0.671	18.12	0.576	6.70

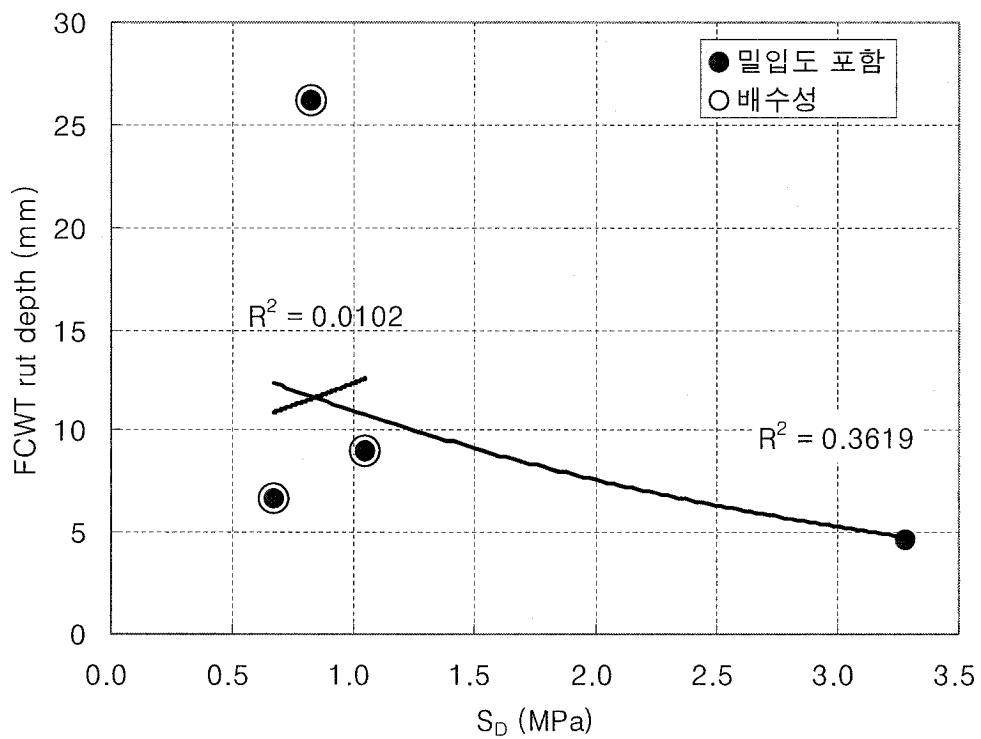


그림 3.70. 배수성 10mm FCWT 시험에서 rut depth와 실험실 공시체 S_D 의 관계

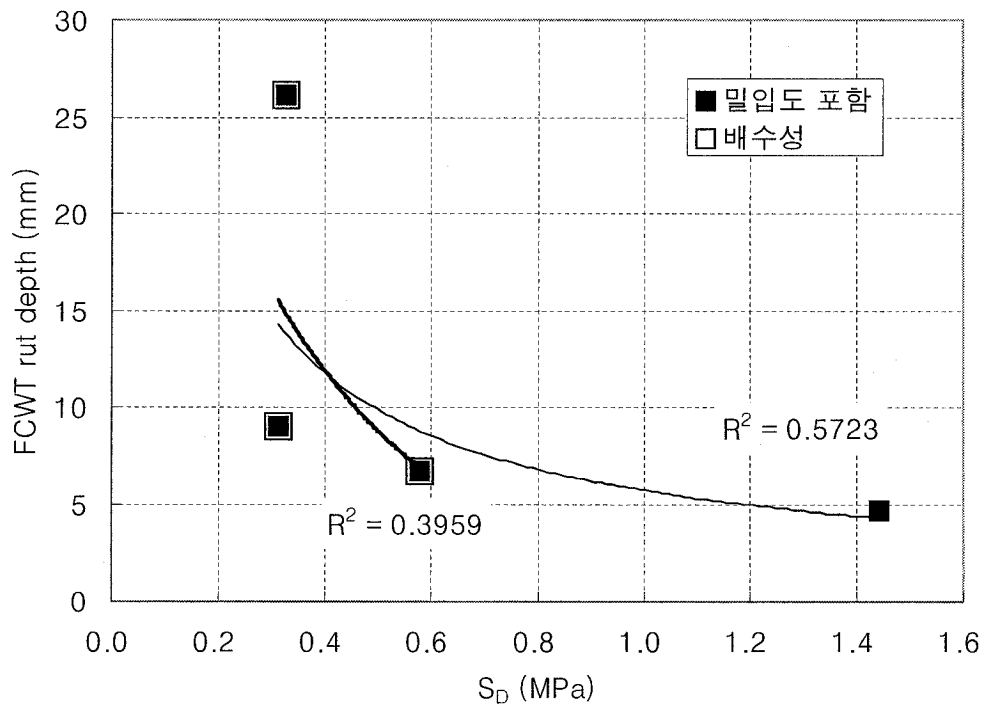


그림 3.71. 배수성 10mm FCWT 시험에서 rut depth와 코어 공시체 S_D 의 관계

8. 배합설계 적용 기준제시 및 표준 시험법 정립

가. 변형강도의 배합강도 설정

전 년도 연구 중 변형강도의 임계치(Critical deformation strength: S_{DC}) 선정연구(김광우 등 2007, 정재현 2007b)에서는 도로 등급별로 표층용 아스팔트 혼합물의 변형강도 최소치를 제시하였다. 이를 보면 일반도로 표층용 아스팔트 혼합물은 직경 100mm 공시체 사용시 3.0 MPa, 대형차 교통량 1일 한 방향 1000대 이상, 또는 20년 설계 ESAL $> 10^7$ 인 중 교통도로 포장(이하 간선도로 포장)용 표층 혼합물의 경우 4.0 MPa 이상이다. 하지만 이 임계치는 콘크리트로 본다면 설계기준 강도에 해당되는 개념의 기준치이고 배합강도는 안정적으로 혼합물들이 소정의 임계치를 넘기 위해 더 높은 값으로 설정되어야 한다. 그래야 혼합물 제조시 골재, 바인더 등 재료에 내재한 불확실성(uncertainty)과 혼합, 제조 및 시공 상의 오차 때문에 발생하는 품질의 변동성(variation)으로 인하여 변형강도가 임계치보다 낮아질 확률을 줄일 수 있다. 따라서 본 연구의 목적은 그간의 시험 data와 통계적 이론을 적용하여 변형강도의 배합강도를 선정하는 방법을 연구하고 실제 배합설계 시에 적용치를 제시하는 것이다.

나. 변형강도 배합강도의 개념

밀입도 아스팔트 혼합물의 변형강도는 반복주행(Wheel tracking: WT) 시험은 물론 아스팔트 포장분석기(Asphalt pavement analyzer: APA) 시험 결과와의 상관관계도 높다(Doh et al 2007, Kim et al. 2003, 2004, 2007, 2008, 김광우 등 2003, 2004, 백성현 2007). 또한 변형강도는 동적크리프시험과 상관관계도 크며 (Kim et al. 2005, 김광우 등 2005, 2005c), 모의 주행시험(김광우 2006b)과 실제 도로현장에서 채취된 코어의 변형강도와 그 지점의 소성변형 깊이와도 상당한 상관관계를 보여준다(Park et al. 2007, 백성현 2007b). 이러한 데이터를 근거로 아스팔트 혼합물이 일정수준 이상의 변형강도를 가지도록 제조하면 특정 시험에서 일정수준 이상의 저항성을 보일 것

임을 추측케 한다. 그리고 특히 S_D 는 소성변형에 관심을 가지고 개발되었음으로 소성변형 관련 시험 치와의 상관관계를 통해 S_D 의 임계치를 추정, 제시할 수 있을 것이다.

즉, 아스팔트 혼합물의 변형강도(S_D)가 일정치 이상이면 소성변형 저항성 시험에서 특정 기준을 만족하는 성능을 나타내는 것을 확인하였다(Park et al 2007, 김광우 등 2007, 정재현 2007b). 이와 같은 근거 하에서 다양한 밀입도 시험 data를 이용하여 변형강도의 임계치 (Critical deformation strength: S_{DC})가 산정·제시되었다 (김광우 등 2007, 정재현 2007b, 한국형.. 2007).

대부분의 공학적 특성치가 그렇듯이 아스팔트 혼합물의 변형강도와 rut depth의 통계적 분포도 정규분포를 따르는 것으로 가정할 수 있다. 따라서 특정 혼합물의 변형강도나 rut depth 평균이 $\bar{X}$ 이라면 그 점에서 해당 특성치의 분포는 그림 3.62와 같이 정규분포로 나타낼 수 있다. 여기서 각 점에서 각각의 분포도는 해당 변수의 정규분포 확률밀도 함수(Probability density function: PDF)의 개략도이다.

또한 그림의 주곡선은 미국 South Carolina (SC)주의 전국망(주 간) 고속도로 (Interstate highway)와 주 도로 (State highway)에 사용된 50종 이상의 혼합물과 실험실에서 얻어진 20여 가지 혼합물에 대한 APA와 S_D 시험에서 얻어진 data의 회귀분석을 통해 그려진 것이다.

이 결과에서는 직경 100mm 공시체의 변형강도가 3.0 MPa이상이면 APA 시험에서 Rut depth가 미국 South Carolina 도로국에서 제시한 일반도로포장 기준(Hot-mix... 2007)인 5mm (Hot-Mix Asphalt... 2007) 이하를 만족하는 것으로 나타났다. 같은 방법으로 분석결과 변형강도가 4.0 MPa이상이면 APA 시험에서 Rut depth가 미국 South Carolina 도로국에서 제시한 기준인 3mm (Hot-Mix Asphalt... 2007) 이하를 만족하는 것으로 나타났다. 하지만 특정 혼합물의 변형강도 평균이 3.0 MPa이라고 해서 늘 APA 기준을 만족하는 것은 아니다. 즉, 평균이 3.0 이라는 것은 여러 data가 모여 만들어진

것이므로 그림 3.72의 “ S_D 평균 3 MPa에서의 통계적 분포 (PDF)”와 같이 하나의 분포를 가질 것이다.

다시 말해 만일 $\bar{X} = 3$ MPa이 되도록 제조한 혼합물의 변형강도가 정규 분포를 따른다면 그 혼합물의 반은 3이하 반은 3이상을 보이게 될 것이다. 따라서 임계치가 특정 값으로 주어진 경우 혼합물의 대부분이 임계치를 넘으려면 그 평균은 임계치보다 높게 책정 되어야 한다. 즉, 혼합물을 제조할 때 배합설계에서 얻어지는 강도(이하 배합강도)는 임계치보다 높게 제조되어야 한다. 그리고 임계치보다 얼마나 높게 증가시켜 제조되어야 하는지는 혼합물의 분산(variance)의 정도와 임계치보다 낮은 것이 허용되는 비율에 따라 결정된다. 이러한 모든 것을 고려하여 배합강도의 설정을 위해서 아래에서와 같이 통계적 품질관리 기법이 도입되었다.

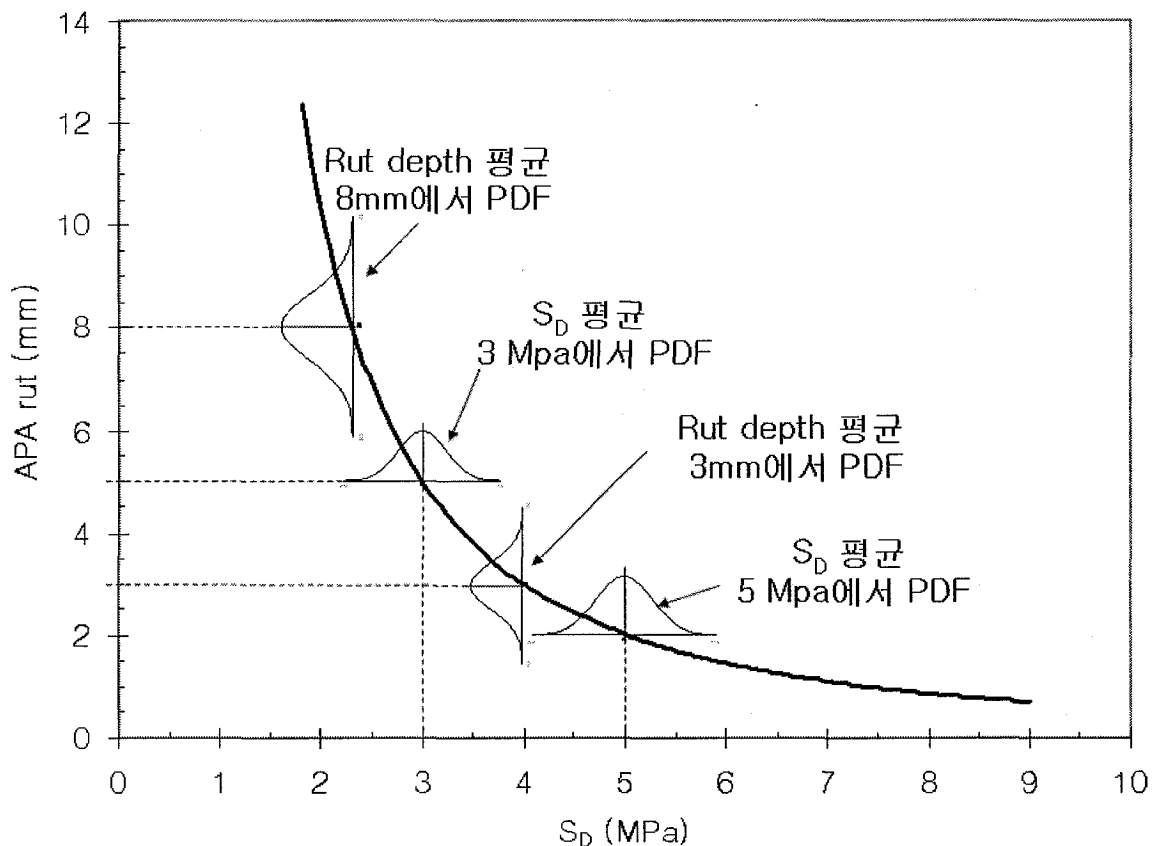


그림 3.72. APA rut depth vs. S_D relationship and PDF at each point for each variable

다. 검사특성(Operation characteristics: OC)곡선의 응용

통계적으로 불량한 아스팔트 혼합물이 도로에 포설되어 소비자(시민)가 사용하게 되는 확률을 소비자 위험(Consumer risk: CR) 확률이라 하고 생산자가 우수한 혼합물을 생산하였음에도 불합격되는 확률은 생산자 위험(Producer risk: PR) 확률이라 한다. 즉, 소비자 위험확률이란 나쁜 제품이 합격되어 소비자가 불량 제품을 쓰게 될 확률(β)이고, 생산자 위험확률이란 좋은 물건을 생산하고도 불합격 판정을 받을 확률(α)이다. 이를 검사특성곡선 (Operation characteristics (OC) curve)에서 나타내면 그림 3.73과 같다.

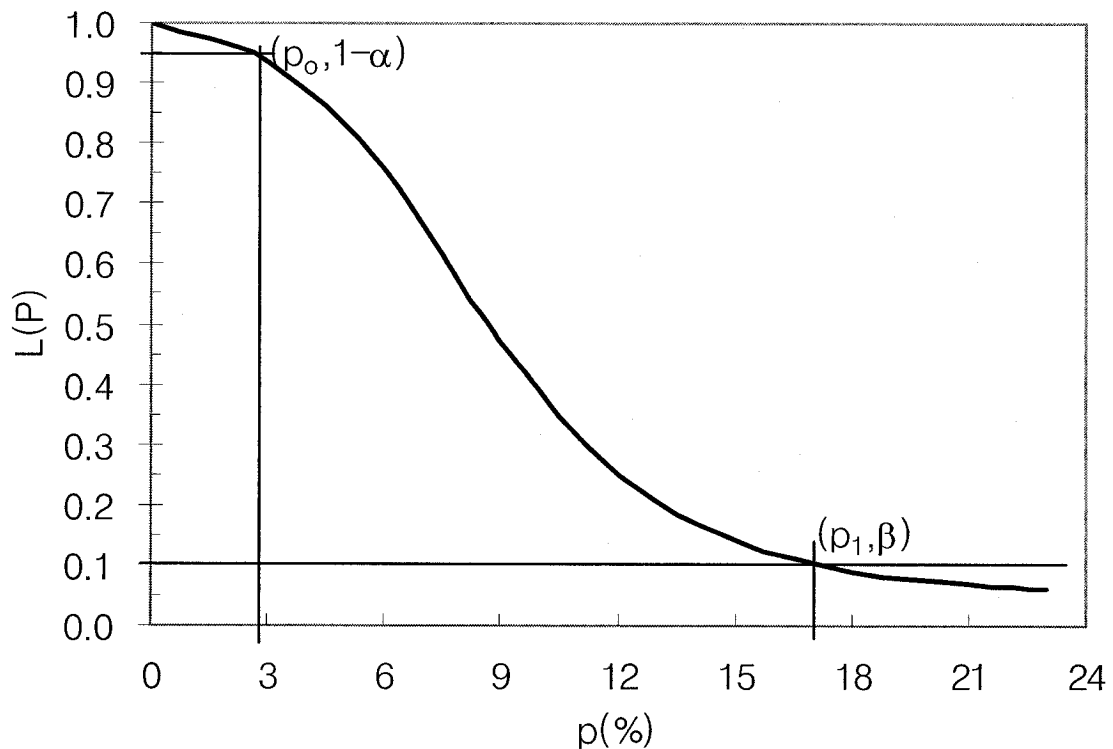


그림 3.73. Operation characteristics (OC) curve에서의 생산자 위험률(a)과 소비자 위험률(b), 그에 해당하는 합격 품질수준(p_0)과 허용 불량률(p_1)

일반적으로 PR과 CR의 값은 각각 5% ($\alpha=0.05$)와 10% ($\beta=0.1$)를 사용한다(박성범 2002). 이때 α 에 해당하는 품목집단(Lot)의 불량률을 p_0 , β 에 해당하는 Lot의 불량률을 p_1 이라 한다. 일반적으로 p 값은 생산품의 종류에

따라 다르나 p_0 는 합격 품질 수준 (Acceptable Quality Level: AQL)과 일치하고 p_1 은 Lot의 허용 불량률(Lot tolerance percent defective: LTPD)과 일치한다. 즉 AQL은 소비자가 만족할 수 있는 불량률 중 최대치이고, LTPD는 불합격 품질 수준 (Rejectable Quality Level: RQL)이라 할 수 있다.

따라서 소비자 위험확률 개념을 아스팔트 혼합물의 변형강도에 적용하면 어떤 플랜트에서 지속적으로 생산되는 아스팔트 혼합물이 어느 정도의 배합강도 수준(공정 평균: Process average, m)을 유지해야 안정적으로 이 확률을 만족할 수 있는지 알 수 있다. 그림 3.74에서와 같이 전체 혼합물의 10%가 기준치를 벗어날 확률로 공정평균을 유지하면 소비자 위험확률은 10% ($b=0.1$)이다. 즉, 임의의 배치의 혼합물의 변형강도가 임계치 이하일 확률 (Probability of failure: P_f)을 10% 이하로 유지하려면 배합강도를 더 높여 혼합물의 합격률(신뢰도)을 0.9 (90%) 이상으로 유지해야 할 것이다. 다시 말해 $P_f \leq 0.1$ 이어야 한다. 혼합물의 변형강도는 정규분포를 따른다고 가정하고 표준편차를 알 경우 일반적으로 3개 또는 그이상의 공시체($n \geq 3$)를 제조해 측정될 공정평균 (배합강도) 값 m 을 제시할 수 있다.

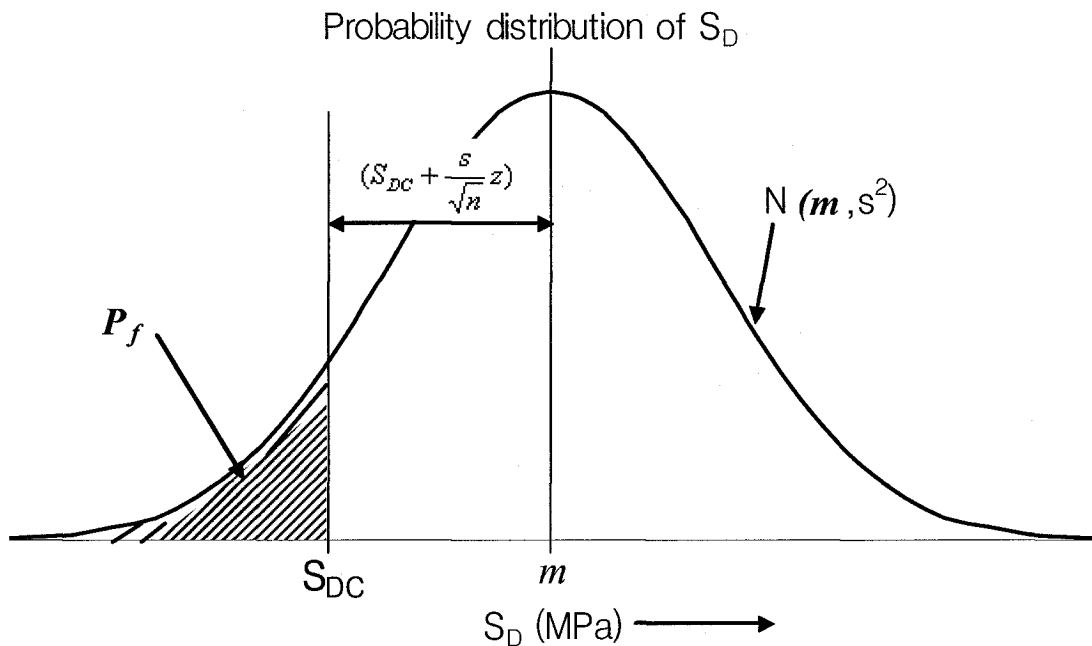


그림 3.74. 아스팔트 혼합물의 임계변형강도(S_{DC})와 배합강도(m)의 관계

그림 3.74는 변형강도 PDF에서 통계적으로 임계치와 평균치와의 관계를 나타내며, 임계치(S_{DC})와 $\beta(P_f)$ 가 주어지면 공정평균으로 표현되는 배합강도(m)는 S_{DC} 보다 $sz/\sqrt{n}$ 만큼 커야함을 알 수 있다. 여기서 s 는 표준편차, n 은 공시체 수, z 는 표준정규분포 표에서 구하고자 하는 확률 값에 따른 함수로서 $z = \frac{\bar{x} - m}{s/\sqrt{n}}$ 이다. 여기서, $\bar{x}$ 는 임의의 혼합물의 평균값이고 s 는 이때의 표준편차이다.

라. 배합강도 산정

1) 이론적 근거

본 연구에서는 다양한 밀입도 표층 아스팔트 혼합물의 변형강도를 이용하여 변동계수(Coefficient of variation: V_C)를 구하고 이를 통계적으로 적용하였다. 여기서 변동계수 V_C 는 표준편차의 평균에 대한 비율로서,

$$V_C = \frac{s}{m} \times 100(\%) \quad \text{-----} \quad (4)$$

여기서, s = 표준편차, m = 평균이다.

평균 m 은 구하고자 하는 수치(공정평균: n 개 공시체의 변형강도 배합강도)로 미지수이며, 표준편차는 식 (4)로부터 $s = m \times \frac{V_C}{100}$ 이다. 이를 이용해 기준치를 넘어날 확률 (P_f)에 해당하는 z 값을 표준정규분포 표에서 찾아 이를 $z = \frac{\bar{x} - m}{s/\sqrt{n}}$ 로 놓고 이 수식의 s 에 상기의 $s = m \times \frac{V_C}{100}$ 를 대입하면 $z = \frac{100(\bar{x} - m)\sqrt{n}}{m V_C}$ 이다. 이 식의 $\bar{x}$ 에 그림 3.64의 S_{DC} 를 대입하면 $z = \frac{100(S_{DC} - m)\sqrt{n}}{m V_C}$ 이다. 이 식을 구하고자하는 m 에 대한 수식으로 정

리하면 $zm V_C = 100S_{DC}\sqrt{n} - 100m\sqrt{n}$ 이고,

$m(zV_C + 100\sqrt{n}) = 100S_{DC}\sqrt{n}$ 로부터 식 (5)를 얻는다.

$$m = S_{DC} \left[\frac{100\sqrt{n}}{zV_C + 100\sqrt{n}} \right] \text{----- (5)}$$

이 식에서 대괄호 안의 값은 증가계수(Increment factor)에 해당한다. 증가계수를 임계치에 곱하면 구하고자하는 공정평균이 얻어진다. 이 증가계수를 변동계수와 P_f 의 함수로 나타내면 그림 3.75와 같이 되며 이때 주어진 P_f 와 변동계수에 따라 y축에서 얻어지는 수치를 임계치에 곱하면 구하고자하는 배합강도를 얻을 수 있다.

그림에서 볼 수 있듯이 품질관리를 철저히 하여 P_f 를 5%로 맞추면 변동계수가 약 10%일 경우 증가계수는 약 1.106, 품질관리 수준을 낮게 하여 P_f 를 20%로 설정하면 증가계수는 약 1.05이어서 품질관리 수준에 따라 차이가 많이 남을 알 수 있다. 식 (5)의 증가계수 항에서 보면 공시체 수도 증가계수와 관계가 있다. 그림 3.76에서는 P_f 를 10%로 고정할 경우 증가계수를 공시체 수 별로 나타내었다.

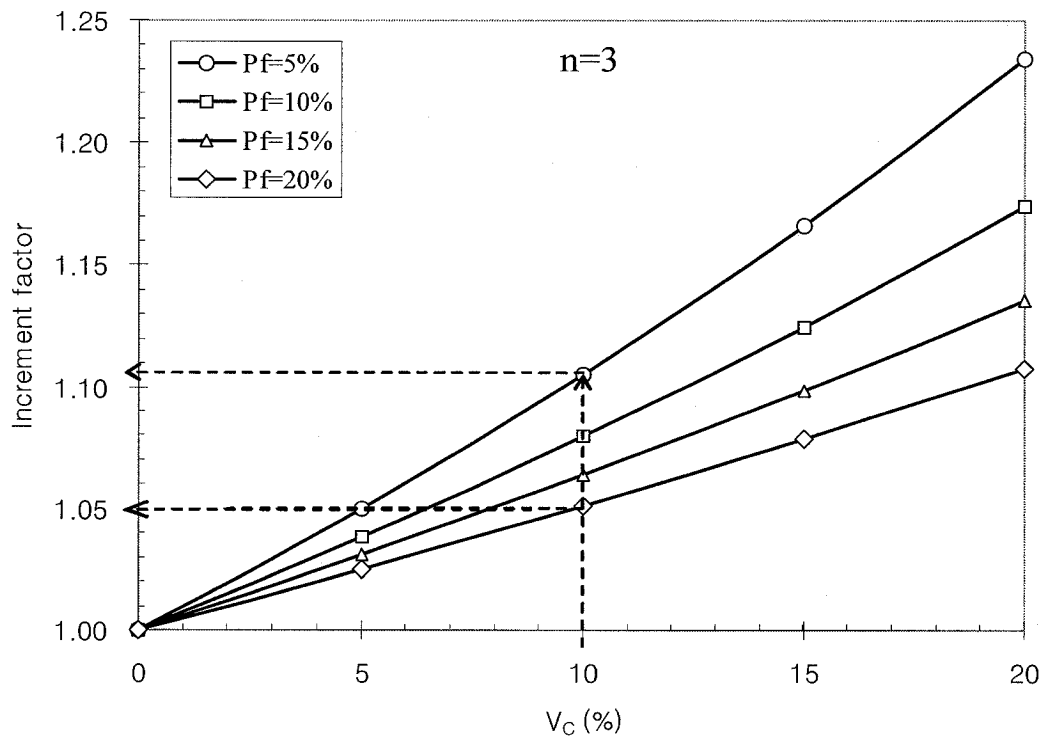


그림 3.75. 공시체의 수가 3일 경우 변동계수 (V_c)와 변형강도가 임계치 이하일 확률 (P_f)에 따른 증가계수의 변화

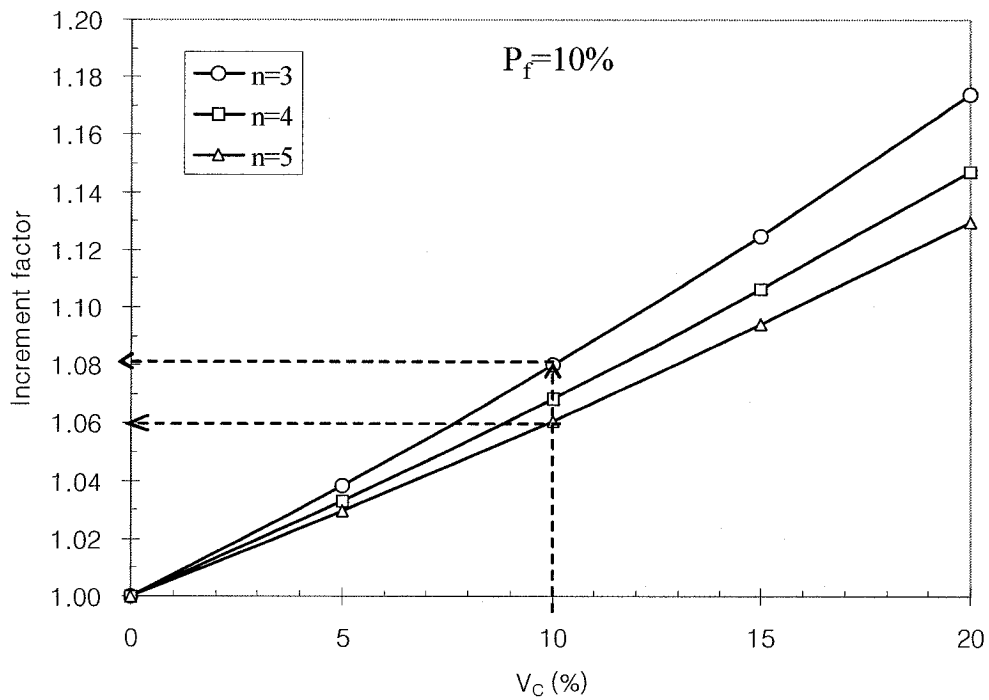


그림 3.76. 임계치 이하일 확률 P_f 를 10%로 할 경우 변동계수 (V_c)와 공시체 수 (n)에 따른 증가계수의 변화

2) 배합강도의 계산

본 연구에서는 최근의 변형강도 성능 평가시험에 사용된 32개 조합 혼합물의 국내 data (아스팔트... 2007)를 이용하였다(표 3.28). 이 변동계수 자료와 앞서 제시한 일반도로용 아스팔트 혼합물(선회다짐 75회로 공시체 제조)과 간선도로 혼합물(선회다짐 100회로 공시체 제조)의 변형강도의 임계치(Critical Sp: $S_{DC} = 3.0$ 과 4.0 MPa)를 이용하여 배합강도를 구하였다. 이 임계치는 아스팔트 혼합물의 배합설계 지침(안) (2007)의 연구에서 사용된 것으로 변형강도와 APA 시험결과와의 상관성 분석으로부터 100mm 공시체에 대하여 산정한 것이다.

표 3.28. 골재 크기 및 종류별 변형강도 평균치 및 변동계수 (CV)

Variable	Max agg. size	Agg. source	Mean	Note
Mean S_D (MPa)	3.975	3.480	3.728	2 agg sizes x 2 agg sources x 4 binders x 2 tests = 32 combinations
V_C (%)	8.008	8.789	8.399	

표 3.28에서 변형강도의 변동계수 평균은 8.4%로 주어졌으므로 $s=0.084m$ 이다. 이를 이용해 정규분포 표에서 모집단의 10% (0.1)가 기준을 벗어날 확률(임계치 미만일 확률)에 해당하는 z 값을 찾으면 $z_{0.1} = -1.28$ 이다. 여기서 식 (5)의 증가계수를 구하기 위해 $n=3$, $V_C=8.4\%$ 를 대입하면

$$\frac{100\sqrt{n}}{zV_C + 100\sqrt{n}} = \frac{100\sqrt{3}}{-1.28 \times 8.4 + 100\sqrt{3}} = \frac{173.21}{162.45} = 1.066 \text{이며, 이로부터 } m = 3 \times 1.066 = 3.198 \text{을 얻는다.}$$

이를 소수점 두 자리까지만 표기하면 배합강도는 3.20MPa이다. 즉, 해당 혼합물 90% 이상의 공정평균(Lot mean: m)이 안정적으로 임계치 3.0을 넘으려면 3개 공시체 측정치의 평균이 3.2MPa 이상이 되어야 한다. 같은 방식으로 간선도로 혼합물의 임계치 4.0MPa의 배합강도를 계산하면 $4 \times 1.066 =$

4.26MPa이나 알기 쉽게 정리될 수 있는 수치인 4.25MPa로 정할 수 있다. 이를 그림으로 나타내면 그림 3.77과 같다.

또한 식 (5)를 풀기 위해서는 임계치(S_{DC}), 공시체 수(n), 표준정규분포 변수 z , 변동계수 (V_C)를 알아야 한다. 여기서 z 는 P_f 의 함수이므로 S_{DC} 와 P_f 가 주어진다면 결국 구하고자 하는 평균값 m 은 V_C 와 n 의 함수이다. 또한 다양한 n 에서 m 을 구하기 위하여 이 두 변수 (V_C 와 n)의 관계를 도표로 나타내면 그림 3.78~3.85와 같다.

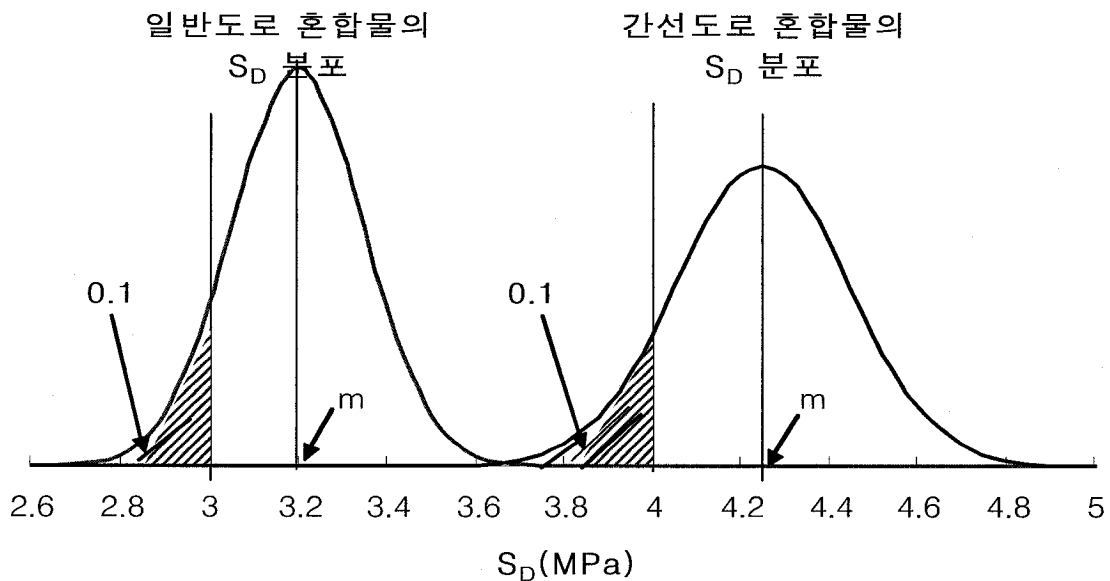


그림 3.77. 일반도로 아스팔트 혼합물과 간선도로 아스팔트 혼합물의 변형강도(S_D) 분포 및 공정 평균 (일반도로 $m=3.2$, 간선도로 $m=4.25$).

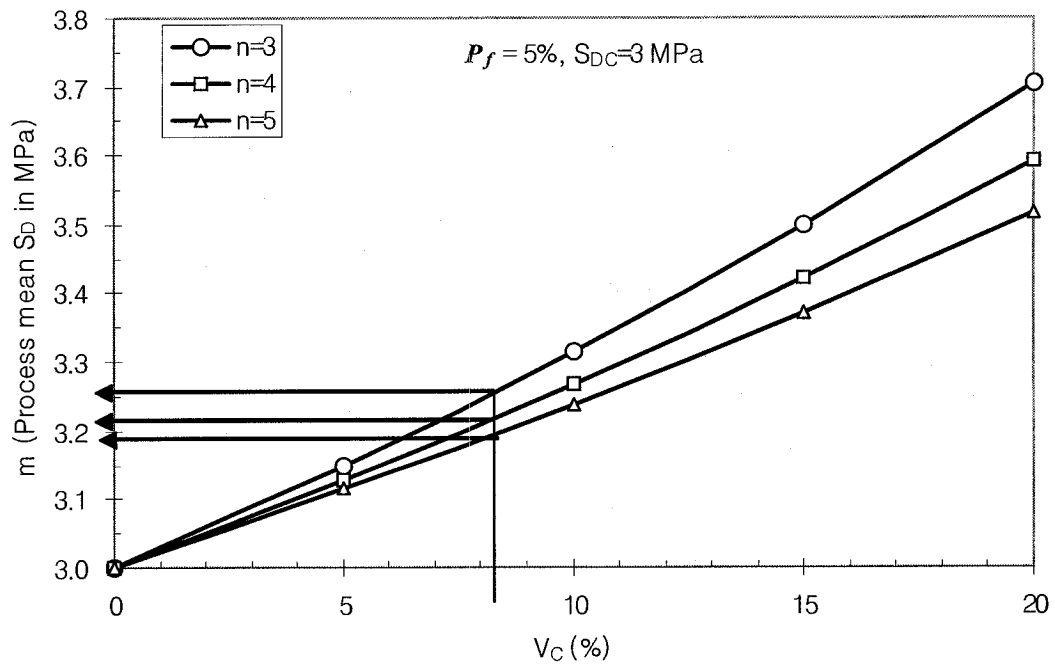


그림 3.78. 임계변형강도(S_{DC})가 3 MPa인 일반도로 표층용 아스팔트 혼합물의 임의의 평균이 임계치 미만일 확률(P_f)을 5%로 제한할 경우 공시체 개수(n)와 변동계수(V_C)에 따른 배합강도(process mean)의 변화

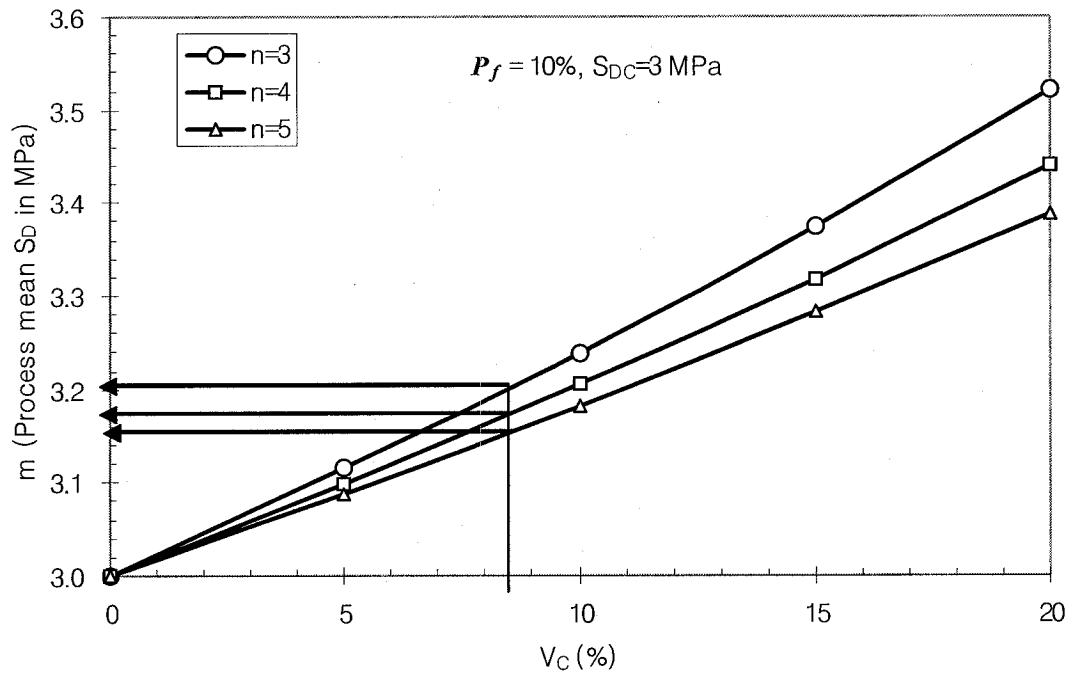


그림 3.79. $S_{DC} = 3 \text{ MPa}$ 인 일반도로 표층용 아스팔트 혼합물의 임의의 평균이 임계치 미만일 확률(P_f)을 10%로 제한할 경우 n 과 V_C 에 따른 배합강도(process mean)의 변화

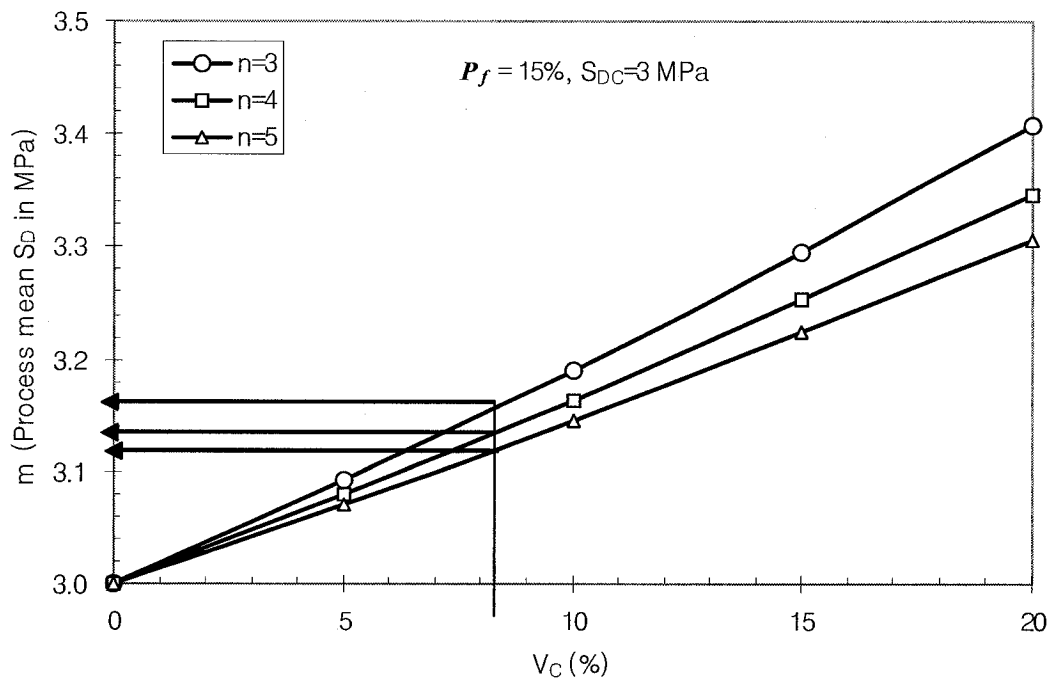


그림 3.80. $S_{DC} = 3 \text{ MPa}$ 인 일반도로 표층용 아스팔트 혼합물의 임의의 평균이 임계치 미만일 확률(P_f)을 15%로 제한할 경우 n 과 V_C 에 따른 배합강도(process mean)의 변화

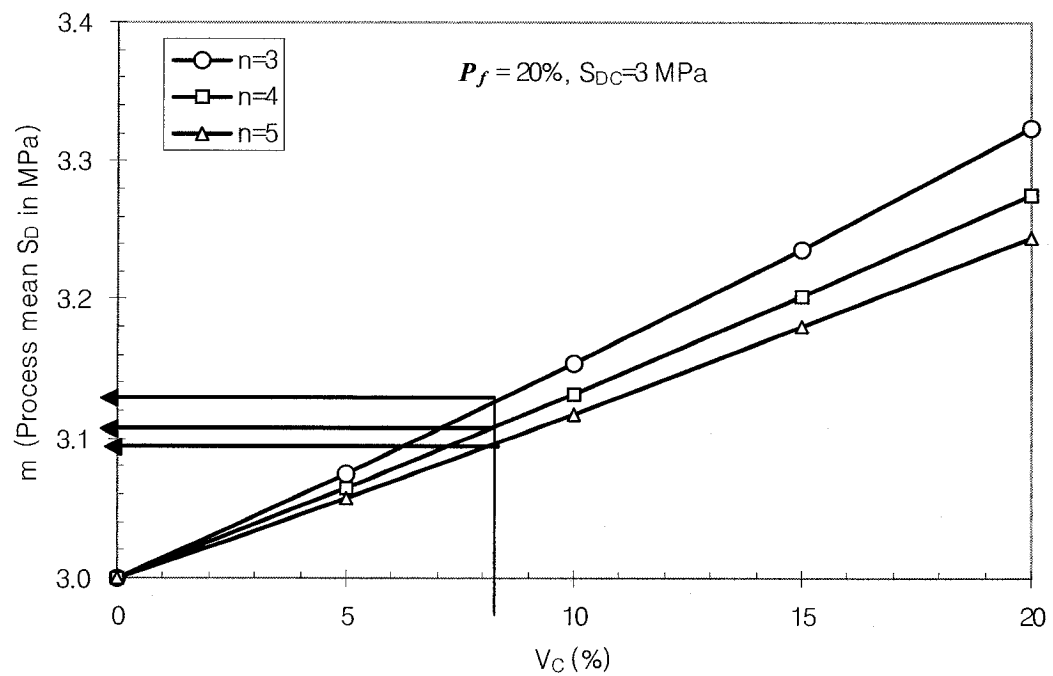


그림 3.81. $S_{DC} = 3 \text{ MPa}$ 인 일반도로 표층용 아스팔트 혼합물의 임의의 평균이 임계치 미만일 확률(P_f)을 20%로 제한할 경우 n 과 V_C 에 따른 배합강도(process mean)의 변화

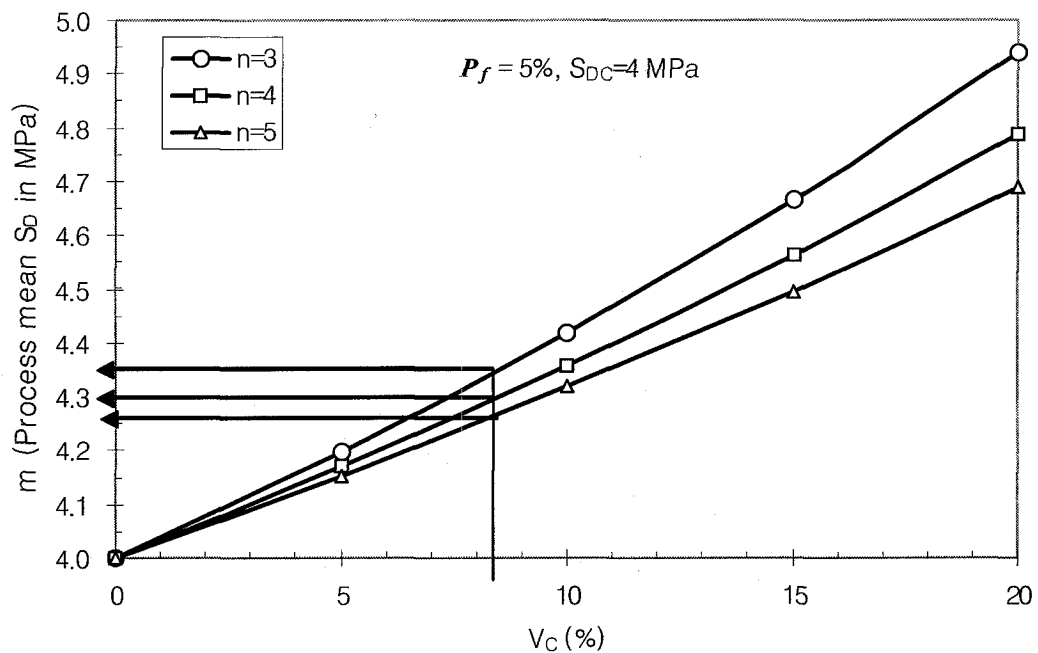


그림 3.82. $S_{DC} = 4 \text{ MPa}$ 인 간선도로 표층용 아스팔트 혼합물의 임의의 평균이 임계치 미만일 확률(P_f)을 5%로 제한할 경우 n 과 V_C 에 따른 배합강도(process mean)의 변화

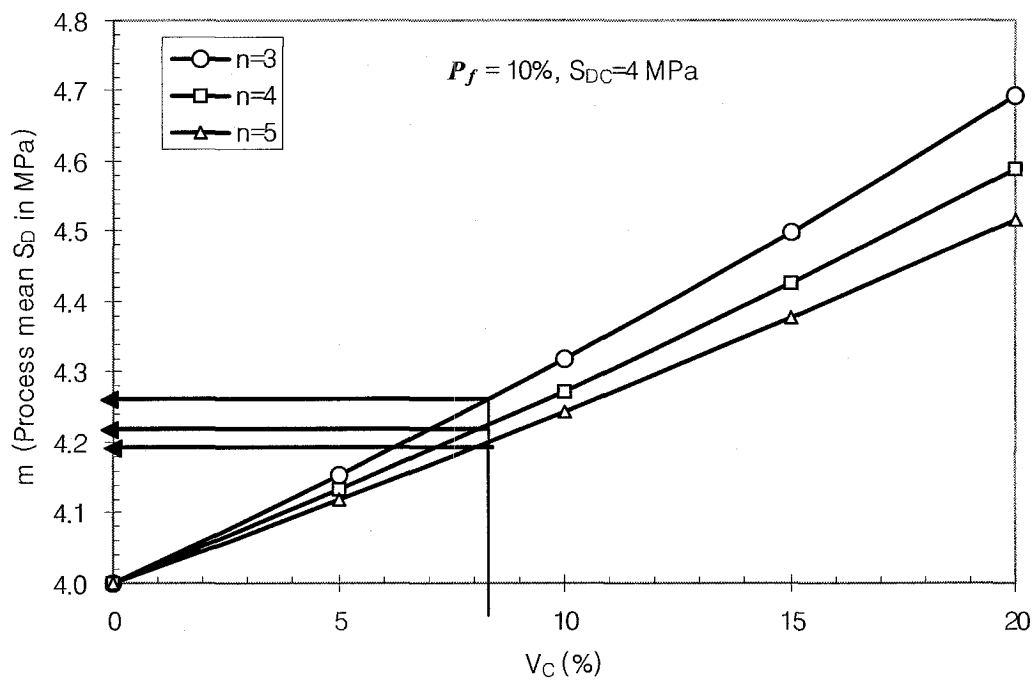


그림 3.83. $S_{DC} = 4 \text{ MPa}$ 인 간선도로 표층용 아스팔트 혼합물의 임의의 평균이 임계치 미만일 확률(P_f)을 10%로 제한할 경우 n 과 V_C 에 따른 배합강도(process mean)의 변화

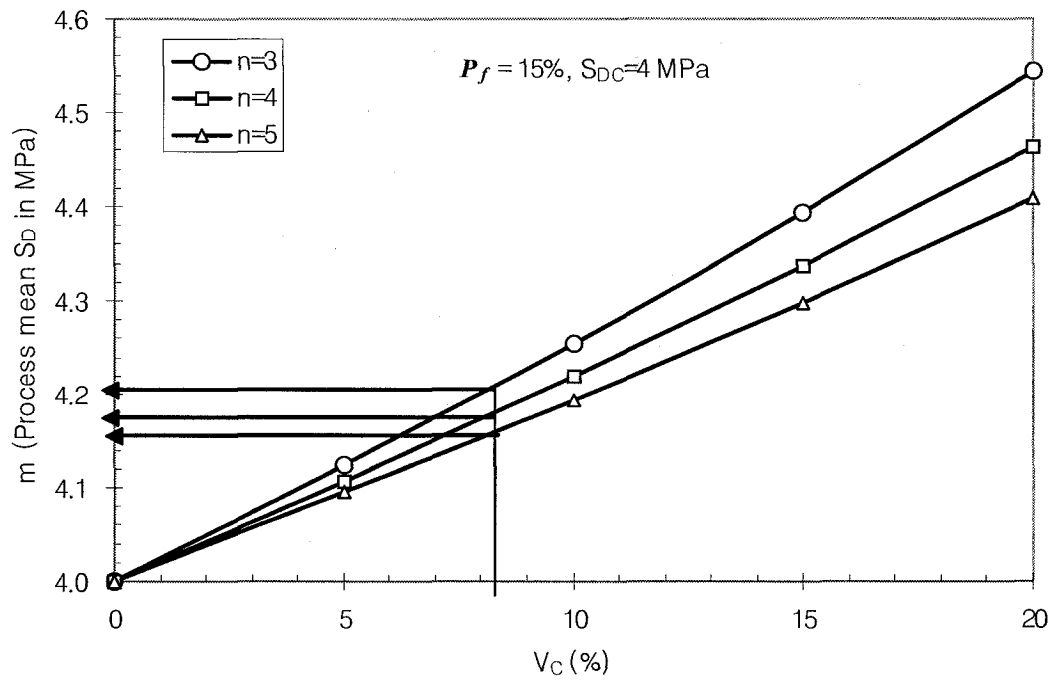


그림 3.84. $S_{DC} = 4 \text{ MPa}$ 인 간선도로 표층용 아스팔트 혼합물의 임의의 평균이 임계치 미만일 확률(P_f)을 15%로 제한할 경우 n 과 V_c 에 따른 배합강도(process mean)의 변화

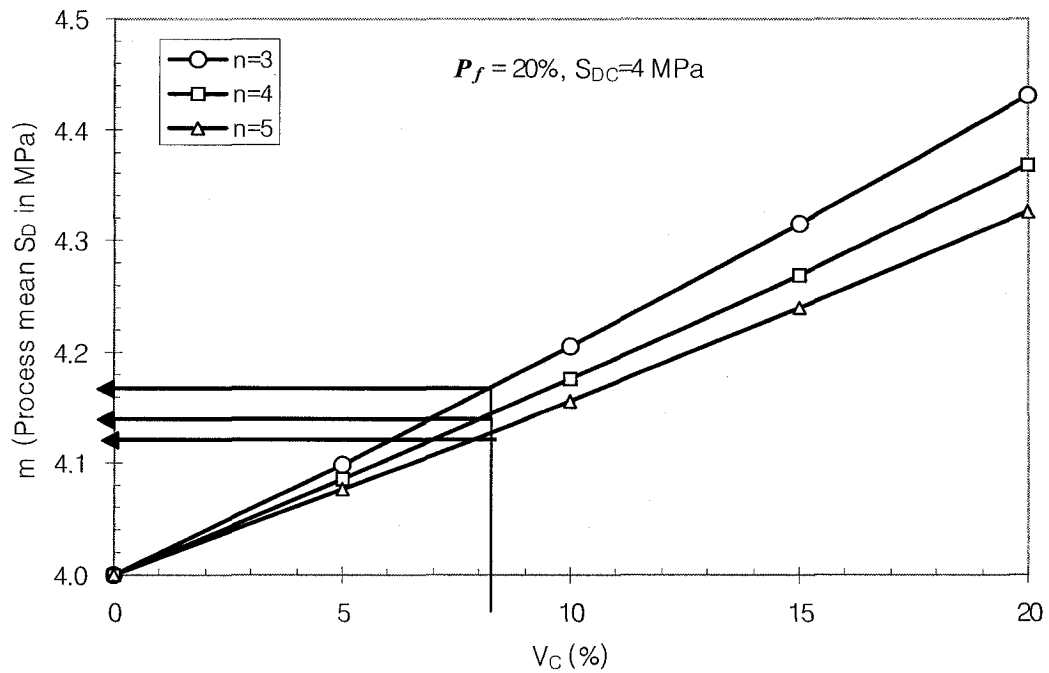


그림 3.85. $S_{DC} = 4 \text{ MPa}$ 인 간선도로 표층용 아스팔트 혼합물의 임의의 평균이 임계치 미만일 확률(P_f)을 20%로 제한할 경우 n 과 V_c 에 따른 배합강도(process mean)의 변화

그림에서 보듯이 변형강도의 배합강도 (공정평균) m 은 같은 n 에서는 V_c 가 커짐에 따라 높아지며, 같은 V_c 에서는 n 의 증가에 따라 낮아진다. 변동계수가 0이면 n 과 P_f 에 관계없이 증가계수는 1이다. 하지만 모든 재료는 똑같은 품질로 생산될 수 없고 내재되어있는 변동성 때문에 편차가 발생하며 이 편차의 정도가 변동계수의 크기로 나타난다.

일단 변동계수가 커지면 증가계수도 거의 선형적으로 늘어나는데 이는 변동성에 따라 품질에 불확실성이 커지므로 임계치 이하로 내려가는 비율을 P_f 이하로 유지하려면 공정평균 m 을 높여야 하기 때문이다. 그러면 혼합물이 임계치 이상으로 얻어질 확률은 $(1-P_f)$ 이 되며 이를 안전 확률 (Probability of safety)이라 할 수 있다. 또한 같은 공시체수, 변동계수라도 임계치 이하로 내려가는 비율인 P_f 의 허용치가 높을수록 공정평균은 낮아도 됨을 알 수 있다. 이는 그림 3.86~3.91을 통해 알 수 있다.

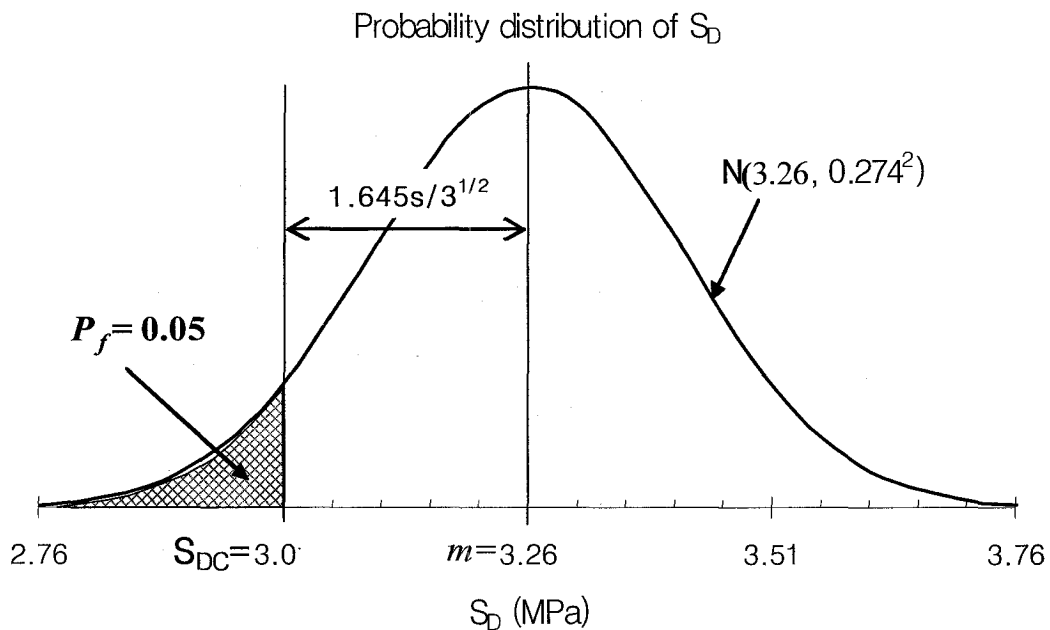


그림 3.86. $S_{DC} = 3 \text{ MPa}$ 인 표충용 아스팔트 혼합물 공시체 3개의 임의의 평균이 임계치 미만일 확률(P_f)이 5% 이하가 되기 위한 배합강도(m)

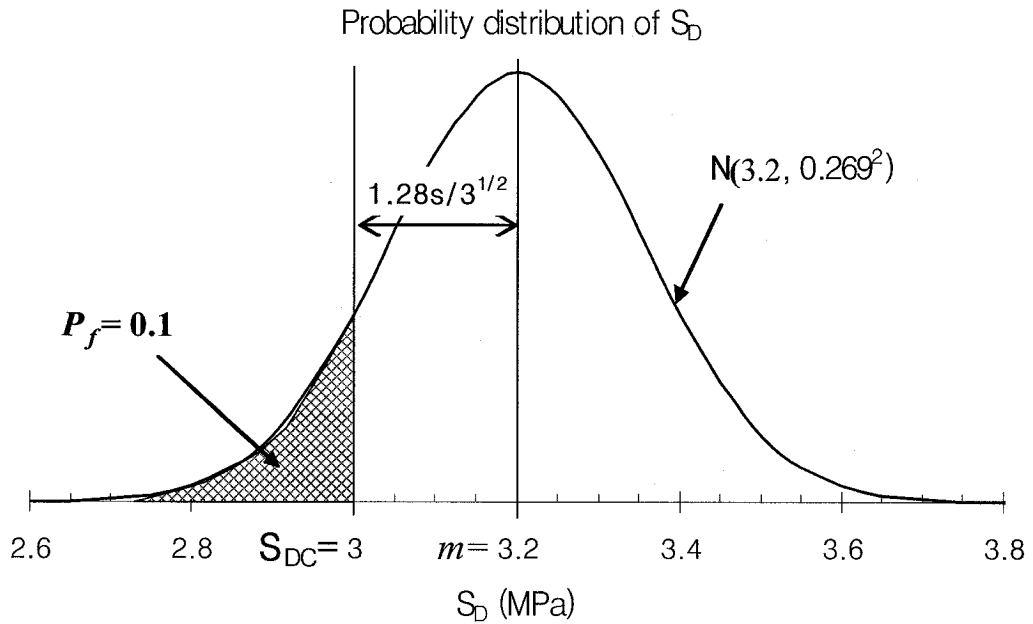


그림 3.87. $S_{DC} = 3$ MPa인 표층용 아스팔트 혼합물 공시체 3개의 임의의 평균이 임계치 미만일 확률(P_f)이 10% 이하가 되기 위한 배합강도(m)

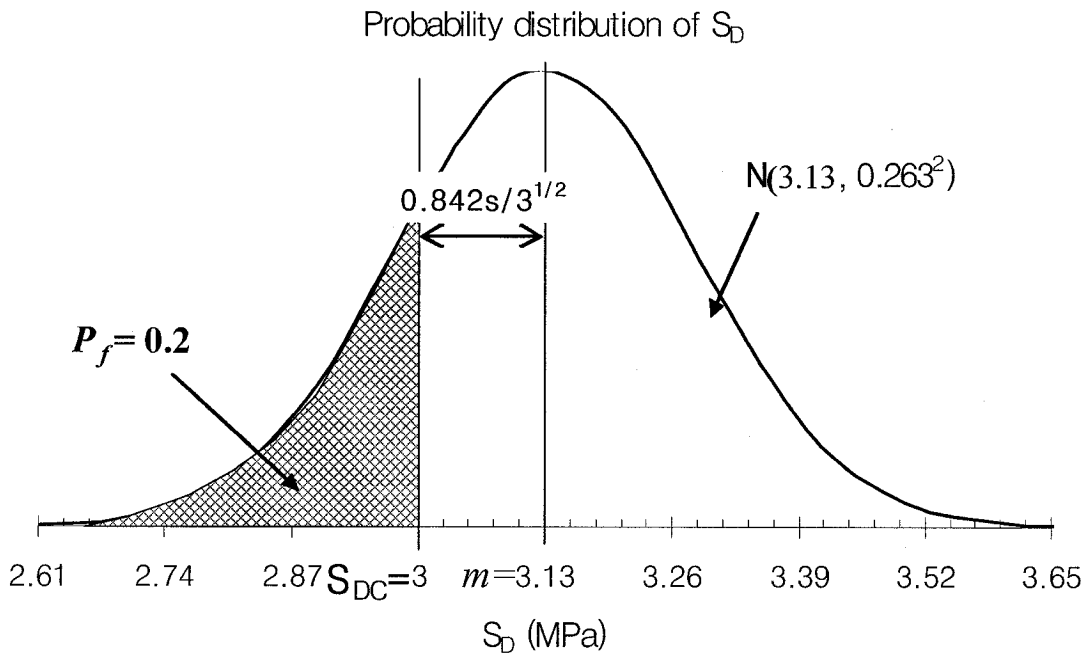


그림 3.88. $S_{DC} = 3$ MPa인 표층용 아스팔트 혼합물 공시체 3개의 임의의 평균이 임계치 미만일 확률(P_f)이 20% 이하가 되기 위한 배합강도(m)

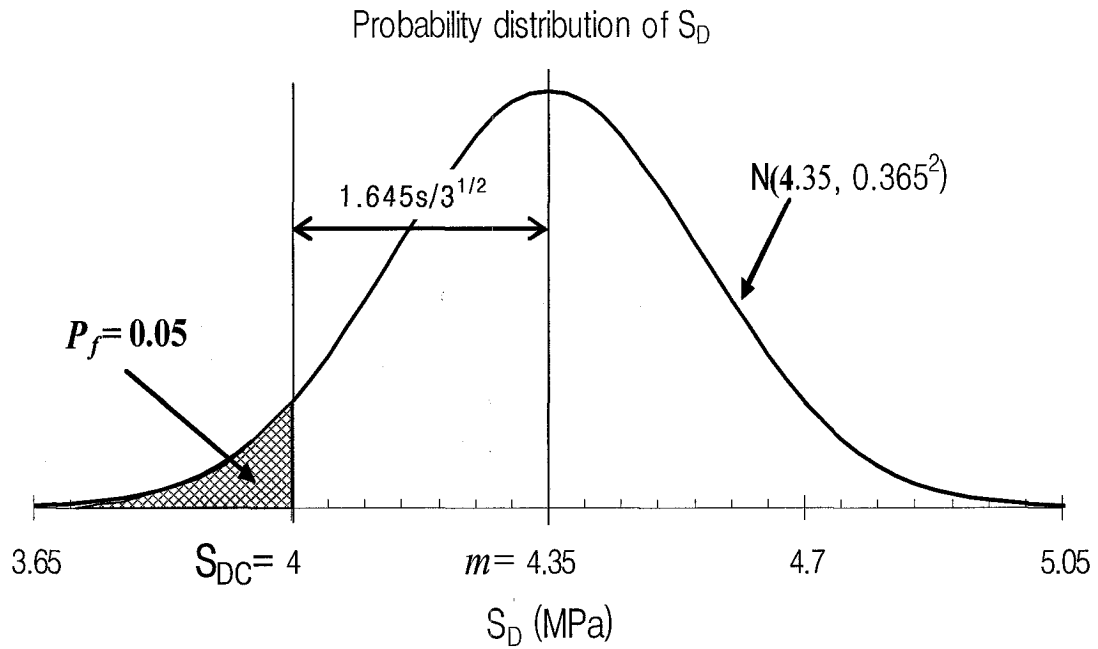


그림 3.89. $S_{DC} = 4$ MPa인 표층용 아스팔트 혼합물 공시체 3개의 임의의 평균이 임계치 미만일 확률(P_f)이 5% 이하가 되기 위한 배합강도(m)

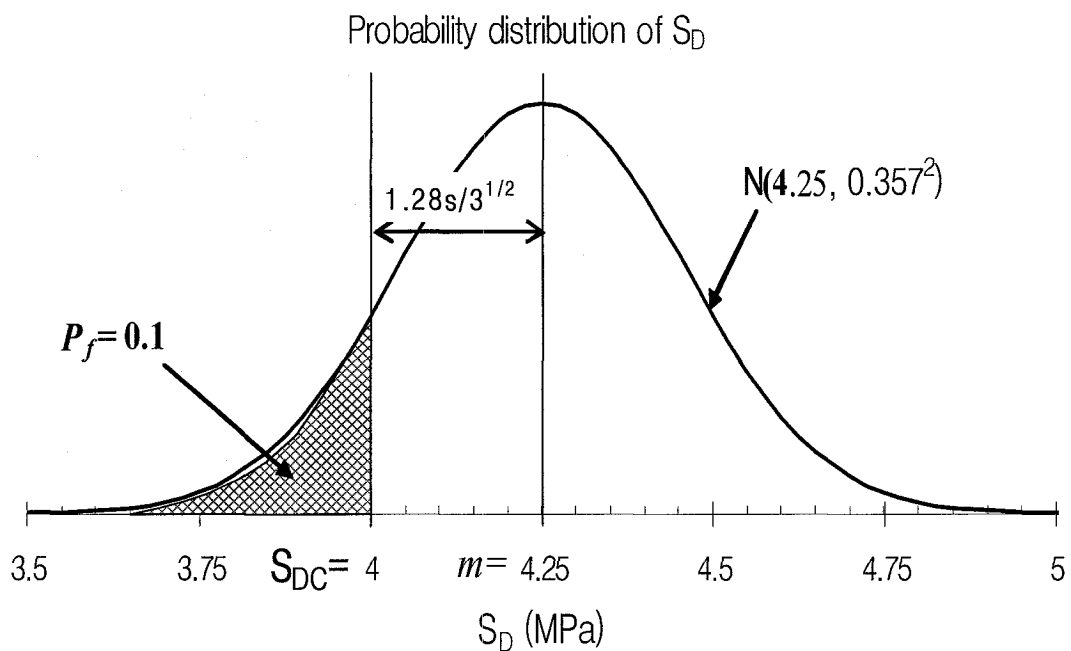


그림 3.90. $S_{DC} = 4$ MPa인 표층용 아스팔트 혼합물 공시체 3개의 임의의 평균이 임계치 미만일 확률(P_f)이 10% 이하가 되기 위한 배합강도(m)

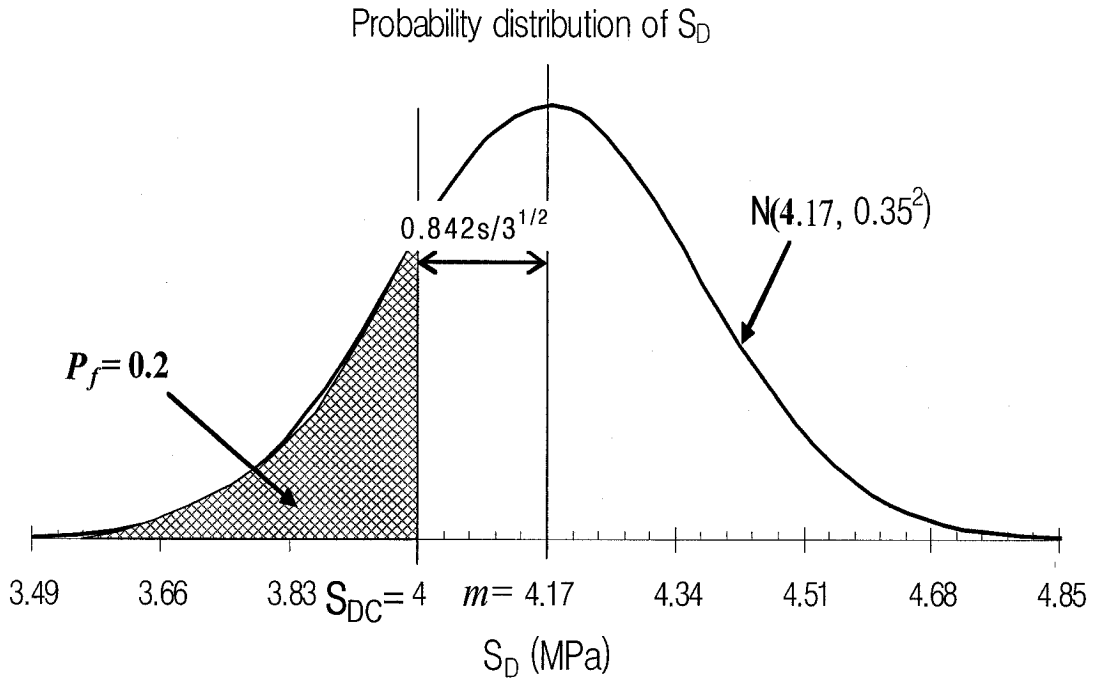


그림 3.91. $S_{DC} = 4$ MPa인 표층용 아스팔트 혼합물 공시체 3개의 임의의 평균이 임계치 미만일 확률(P_f)이 20% 이하가 되기 위한 배합강도(m)

즉, P_f 가 5%(0.05)이면 일반도로와 간선도로용 아스팔트 혼합물의 경우 공정평균(m)이 각각 3.26, 4.35 MPa 이어야 하지만 P_f 가 20%(0.2)로 높아지면 $m=3.13$, 4.17 MPa 이면 된다. 이는 재료 품질의 허용 불량률을 높여줌으로 인해 그만큼 낮은 품질의 혼합물도 허용이 된다는 의미이다. 반대로 말하면 재료 품질의 허용 불량률을 가능한 낮추면 그만큼 높은 품질의 (공정평균이 높은) 혼합물만을 합격시키므로 품질이 우수한 것을 사용하게 된다는 의미이다.

하지만 이를 어느 선에서 정해야 하는지가 생산자와 소비자(시민) 입장에서 의견이 상반된다. 예를 들어 품질이 높은 것만을 원해 허용 불량률을 아주 낮추어 5%로 정하면 우수한 품질의 제품만이 합격되어 시민들은 좋은 재료의 도로포장만을 이용하겠지만 생산자 입장에서는 불합격 제품이 많이 발생한다. 그러면 합격률을 높이기 위해 품질관리를 철저히 하면서 수반되는 비용을 가격에 반영하여 단가를 높이게 되어 반대로 시민들의 세금을 더

많이 소비하는 결과가 될 수도 있다. 이러한 이유 때문에 반대로 허용 불량률을 높여 20%로 하면 품질 수준이 다소 낮지만 가격은 저렴한 혼합물을 사용하게 될 것이다. 이 두 가지 경우 어떤 것이 장기적으로 더 경제적인지는 경제성 분석을 통해 확인해야 할 것이다. 또한 이러한 이유 때문에 허용 불량률을 어느 수준으로 정할지가 매우 중요하다.

이와 같이 재료의 불량률(Probability out of limit: POL)에 따라 아스팔트 혼합물 생산제품의 합격률(Probability of acceptance: PA)이 어떻게 변하는지는 검사특성곡선(Operation characteristics curve: OC 곡선)을 통해 분석이 가능하다. OC 곡선은 혼합물의 공정평균을 통해서도 알 수 있고 또한 혼합물의 불량률은 물론 양호율(Percentage within limit: PWL)에 따라서도 나타낼 수 있다.

그림 3.92는 일반도로 표층용 아스팔트 혼합물에서 임의의 3개 공시체의 S_D 평균 ($\bar{x}$ 또는 $\overline{S_D}$)이 3.0 미만이 될 확률을 나타내는 검사특성(OC) 곡선이다. 여기서 보면 초기에 본 연구에서 설정한대로 공정평균(Process mean)이 3.2인 경우 제품이 불합격 확률 (Probability of failure)이 약 10%임을 알 수 있다. 그리고 그보다 공정평균이 낮으면 불합격률이 크게 증가한다. 즉, $m = 3.1 \sim 2.9$ 사이에서 불합격률이 약 25%에서 약 75%로 크게 변함을 알 수 있다. 이는 그림 3.93의 간선도로용 혼합물에서도 유사하게 나타났다. 따라서 $P_f = 10\%$ 에서 제시된 배합강도(공정평균)는 반곡점의 중간에 있어 더 낮으면 불합격률이 크게 높아져 생산자에게 위험하고 소비자는 배합강도가 이보다 높으면 만족을 할 만한 수준의 품질을 얻을 수 있어 적절해 보인다. 그림 3.94~3.95는 공정평균에 따른 합격률을 보여준다.

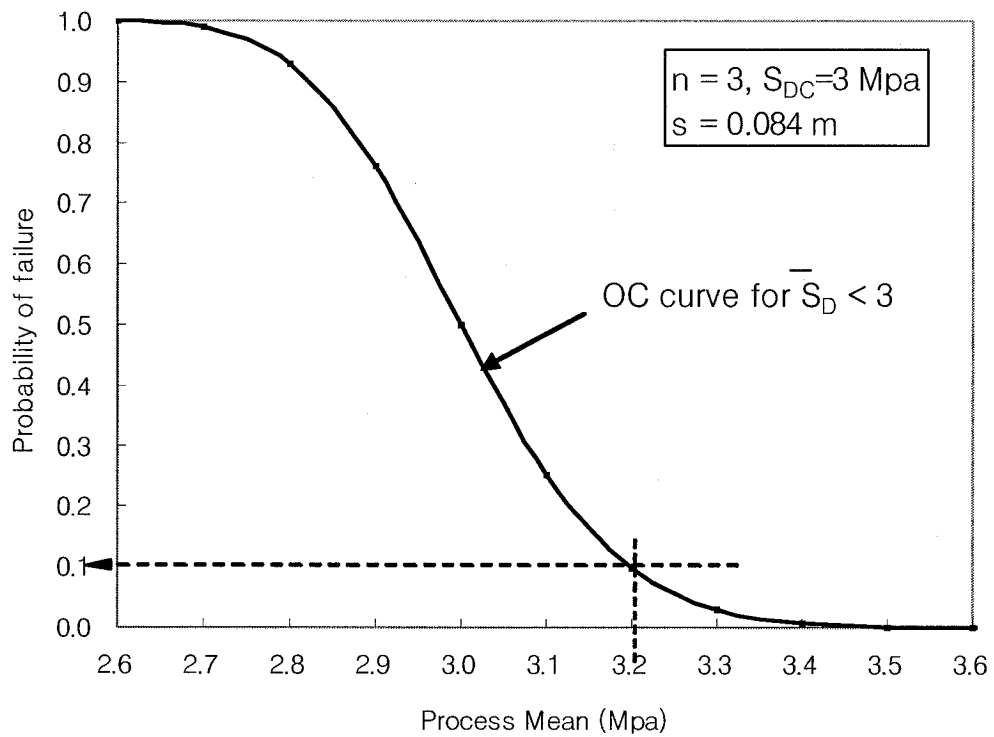


그림 3.92. 일반도로용 표층용 아스팔트 혼합물에서 임의의 3개 공시체의 S_D 평균($\bar{S}_D$)이 $S_{DC}=3.0$ 미만이 될 확률을 나타내는 검사특성(OC) 곡선

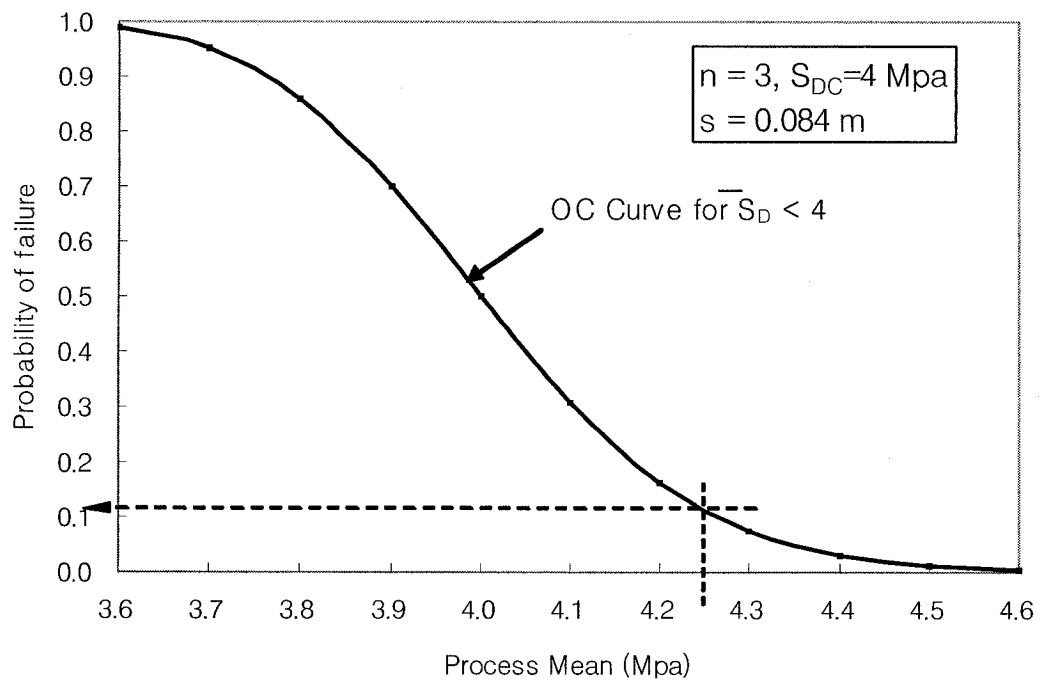


그림 3.93. 간선도로용 표층용 아스팔트 혼합물에서 임의의 3개 공시체의 S_D 평균($\bar{S}_D$)이 $S_{DC}=4.0$ 미만이 될 확률을 나타내는 검사특성(OC) 곡선

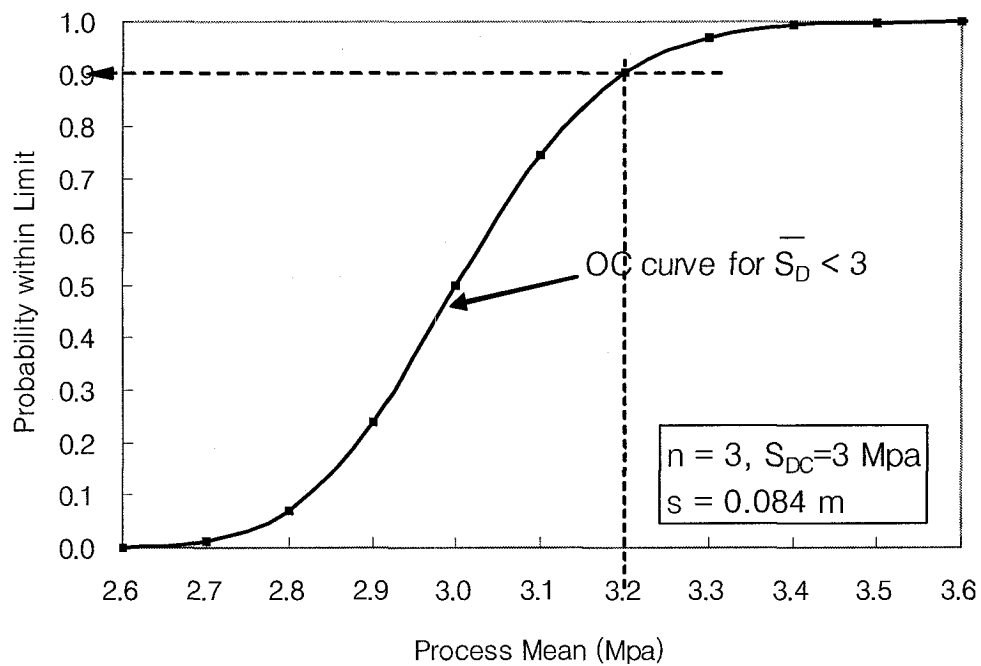


그림 3.94. 일반도로용 표층용 아스팔트 혼합물에서 임의의 3개 공시체의 S_D 평균($\bar{S}_D$)이 $S_{DC}=3.0$ 이상이 될 확률을 나타내는 검사특성(OC)곡선

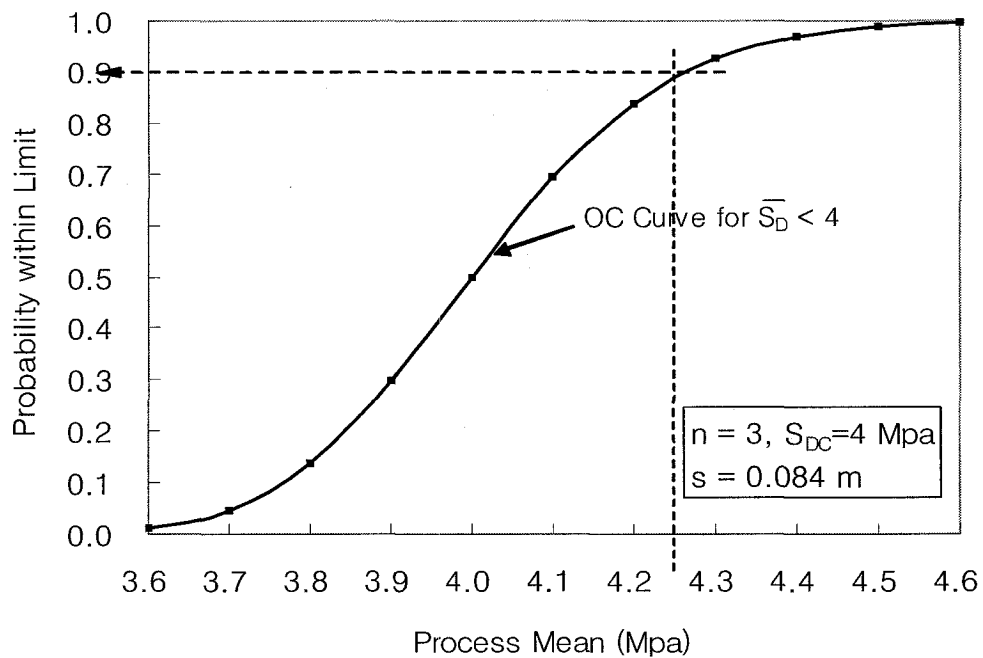


그림 3.95. 일반도로용 표층용 아스팔트 혼합물에서 임의의 3개 공시체의 S_D 평균($\bar{S}_D$)이 $S_{DC}=4.0$ 이상이 될 확률을 나타내는 검사특성(OC) 곡선

마. 검사특성곡선의 작도

이 품질검사 계획에 의하면 플랜트에서 출하되는 일반도로 표층용 아스팔트 혼합물의 무작위 샘플 3개의 변형강도가 3 MPa (간선도로의 경우 4 MPa) 이상이 되는 비율이 90% 이상이면 Lot를 합격시키고 그 미만이면 불합격 시킨다. 이에 대한 확률밀도함수는 이 혼합물의 변동계수를 8.4%로 추정할 경우 그림 3.96과 같이 그려지게 될 것이다. 이 혼합물 Lot의 S_D 는 정규분포를 따르고 표준편차는 $V_c = s / \bar{S}_D \times 100$ 으로부터 $s = V_c \bar{S}_D / 100$ 이며 모집단의 평균 m 은 미지수이다.

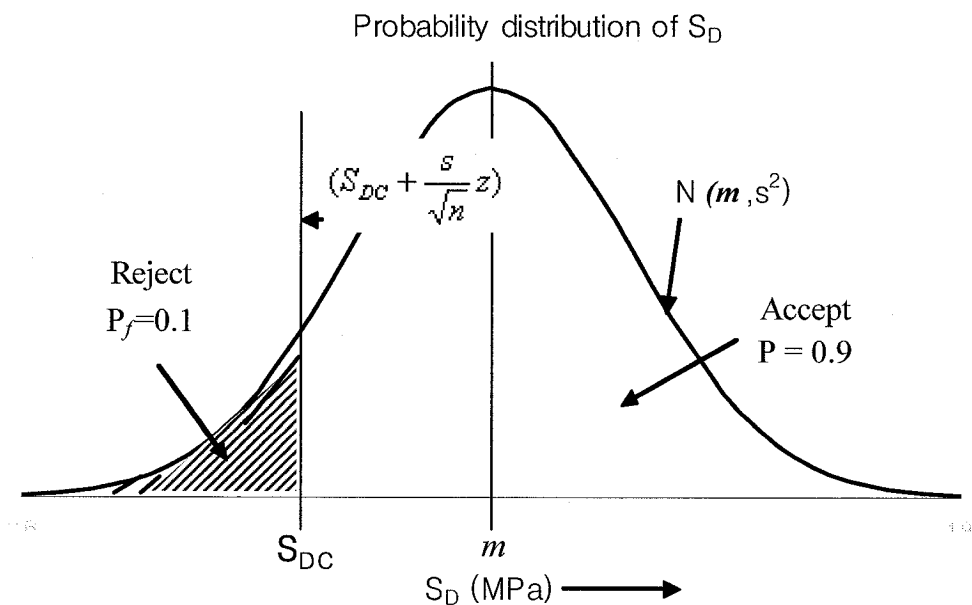


그림 3.96. P_f 가 주어질 경우 공정평균과 임계변형강도의 관계

일반도로용 아스팔트 혼합물의 경우 m 은 $z_{0.1} = \frac{3-m}{m V_c / 100}$ 이며, 정규분포표로부터 $z_{0.1} = -1.28$, $V_c = 8.4\%$ 이므로 $m = 3.2$ MPa이다. 따라서 임의의 공시체 3개의 변형강도 평균 ($\bar{S}_D$)이 3.2MPa 이상이면 해당 Lot는 합격된다. 주어진 실제 혼합물의 합격품질 확률(Percentage within limit: PWL = 어떤 Lot에서 무작위 3개 공시체의 평균이 3.2MPa 이상일 확률)이 주어질 경우 이에 대한 OC곡선을 그려 나타낼 수 있다. 이때 $s = V_c \bar{S}_D / 100$ 이며

$V_c=8.4$, $\overline{S_D}=3.2$ 이면 $s = 0.269$ 이다.

1) 표준편차를 고정하는 경우

표준편차를 고정 값 (일반도로 $s = 3.2 \times 0.084 = 0.269$, 간선도로 $s = 4.25 \times 0.084 = 0.357$)을 사용하여 혼합물의 20%가 기준치 이상이 되는 경우 (PWL = 20%)를 고려해 보자.

$z_{0.2} = 0.842$, $0.842 = \frac{3 - \overline{S_D}}{0.269}$ 이며 무작위 샘플의 변형강도는 $\overline{S_D} = 2.77$ MPa이 될 것이다. 이 평균을 가진 혼합물의 합격 확률 계산은 $z = \frac{3.2 - 2.77}{0.269/\sqrt{3}} = 2.77$ 이므로, $P = 1 - P[x \leq 2.77] = 1 - 0.997 = 0.003$ 으로 매우 낮음을 알 수 있다.

마찬가지로 PWL = 40% 경우, $z_{0.4} = 0.256 = \frac{3 - \overline{S_D}}{0.269}$, $\overline{S_D} = 2.93$ MPa이다. 이 평균을 가진 혼합물의 합격 확률 계산은 $z = \frac{3.2 - 2.93}{0.269/\sqrt{3}} = 1.74$ 이므로, $P = 1 - P[x \leq 1.74] = 1 - 0.959 = 0.041$.

PWL = 60% 경우, $z_{0.6} = -0.256$, $-0.256 = \frac{3 - \overline{S_D}}{0.269}$, $\overline{S_D} = 3.07$ MPa이다. 이 평균을 가진 혼합물의 합격 확률 계산은 $z = \frac{3.2 - 3.07}{0.269/\sqrt{3}} = 0.837$ 이므로, $P = 1 - P[x \leq 0.837] = 1 - 0.799 = 0.201$.

PWL = 80% 경우, $z_{0.8} = -0.842 = \frac{3 - \overline{S_D}}{0.269}$, $\overline{S_D} = 3.23$ MPa이다. 이 평균을 가진 혼합물의 합격 확률 계산은 $z = \frac{3.2 - 3.23}{0.269/\sqrt{3}} = -0.193$ 이므로, $P = 1 - P[x \leq -0.193] = 1 - 0.423 = 0.577$.

PWL = 90% 경우, $z_{0.9} = -1.28$, $-1.28 = \frac{3 - \overline{S_D}}{0.269}$, $\overline{S_D} = 3.34$ MPa이다. 이 평균을 가진 혼합물의 합격 확률 계산은 $z = \frac{3.2 - 3.34}{0.269/\sqrt{3}} = -0.901$ 이므로, $P = 1 - P[x \leq -0.90] = 1 - 0.184 = 0.816$ 이다.

2) 변동계수(V_c)를 8.4%로 고정하는 경우

표준편차를 고정하기보다는 변동계수를 고정하고 각 경우에 평균의 8.4%를 표준편차로 사용하는 방법이 보다 더 현실적이다. 즉, PWL = 20%

경우, $V_C = \frac{s}{\overline{S_D}} \times 100$ 으로부터 표준편차 $s = V_C \times \overline{S_D} / 100$, $z_{0.2} = \frac{3 - \overline{S_D}}{s} = 0.842$

이므로, $\frac{(3 - \overline{S_D}) \times 100}{V_C \overline{S_D}} = 0.842$, $\overline{S_D} = \frac{300}{100 + z V_C} = \frac{300}{100 + 0.842 \times 8.4} = 2.8$

MPa이며, 이때 표준편차 $s = 0.084 \times 2.8 = 0.235$ 이다. 이 평균을 가진 혼합물의 합격 확률 계산은 $z = \frac{3.2 - 2.8}{0.235 / \sqrt{3}} = 2.95$ 이므로, $P = 1 - P[x \leq 2.95] = 1 - 0.998 = 0.002$ 이다.

PWL = 40% 경우, $z_{0.4} = \frac{3 - \overline{S_D}}{s} = 0.253$ 이므로, $\frac{(3 - \overline{S_D}) \times 100}{V_C \overline{S_D}} = 0.253$,

$\overline{S_D} = \frac{300}{100 + z V_C} = \frac{300}{100 + 0.253 \times 8.4} = 2.94$ MPa이며, 이때 표준편차 $s =$

0.247 이다. 이 평균을 가진 혼합물의 합격 확률 계산은 $z = \frac{3.2 - 2.94}{0.247 / \sqrt{3}} =$

1.82 이므로, $P = 1 - P[x \leq 1.82] = 1 - 0.966 = 0.034$.

PWL = 60% 경우, $z_{0.6} = \frac{3 - \overline{S_D}}{s} = -0.253$ 이므로, $\frac{(3 - \overline{S_D}) \times 100}{V_C \overline{S_D}} =$

-0.253 , $\overline{S_D} = \frac{300}{100 + z V_C} = \frac{300}{100 - 0.253 \times 8.4} = 3.065$ MPa이며, 이때 표준편차

$s = 0.257$ 이다. 이 평균을 가진 혼합물의 합격 확률 계산은 $z = \frac{3.2 - 3.065}{0.257 / \sqrt{3}} =$

0.909 이므로, $P = 1 - P[x \leq 0.909] = 1 - 0.818 = 0.182$.

PWL = 80% 경우, $z_{0.8} = \frac{3 - \overline{S_D}}{s} = -0.842$ 이므로, $\frac{(3 - \overline{S_D}) \times 100}{V_C \overline{S_D}} =$

-0.842 , $\overline{S_D} = \frac{300}{100 + z V_C} = \frac{300}{100 - 0.842 \times 8.4} = 3.228$ MPa이며, 이때 표준편차

$s = 0.271$ 이다. 이 평균을 가진 혼합물의 합격 확률 계산은 $z = \frac{3.2 - 3.228}{0.271 / \sqrt{3}} =$

-0.18 이므로, $P = 1 - P[x \leq -0.18] = 1 - 0.428 = 0.572$.

PWL = 90% 경우, $z_{0.9} = \frac{3 - \overline{S_D}}{s} = -1.282$ 이므로, $\frac{(3 - \overline{S_D}) \times 100}{V_C \overline{S_D}} =$

-1.282 , $\overline{S_D} = \frac{300}{100 + z V_C} = \frac{300}{100 - 1.282 \times 8.4} = 3.362$ MPa이며, 이때 표준편차

$s = 0.282$ 이다. 이 평균을 가진 혼합물의 합격 확률 계산은 $z = \frac{3.2 - 3.362}{0.282 / \sqrt{3}} =$

-0.993 이므로, $P = 1 - P[x \leq -0.993] = 1 - 0.16 = 0.84$.

이와 같은 계산을 세분하여 요약하여 정리하면 표 3.29와 같다. 이 표에서 보면 표준편차 합격확률(PA)에 다소 차이가 있으나 이는 그리 크지 않다. 또한 이를 그림으로 나타내면 그림 3.97부터 3.100과 같다.

표 3.29. Comparison of Probability of acceptance for using two standard deviations.

Mixture	PWL(%)	95	90	80	70	60	50	40	30	20
	POL (%)	5	10	20	30	40	50	60	70	80
Local highway	PA for s=fixed	0.941	0.824	0.567	0.352	0.198	0.099	0.042	0.014	0.003
	PA for s=0.84m	0.952	0.840	0.572	0.342	0.182	0.085	0.033	0.010	0.002
Arterial highway	PA for s=fixed	0.935	0.831	0.596	0.379	0.211	0.099	0.036	0.009	0.001
	PA for s=0.84m	0.959	0.858	0.603	0.373	0.205	0.099	0.040	0.012	0.002

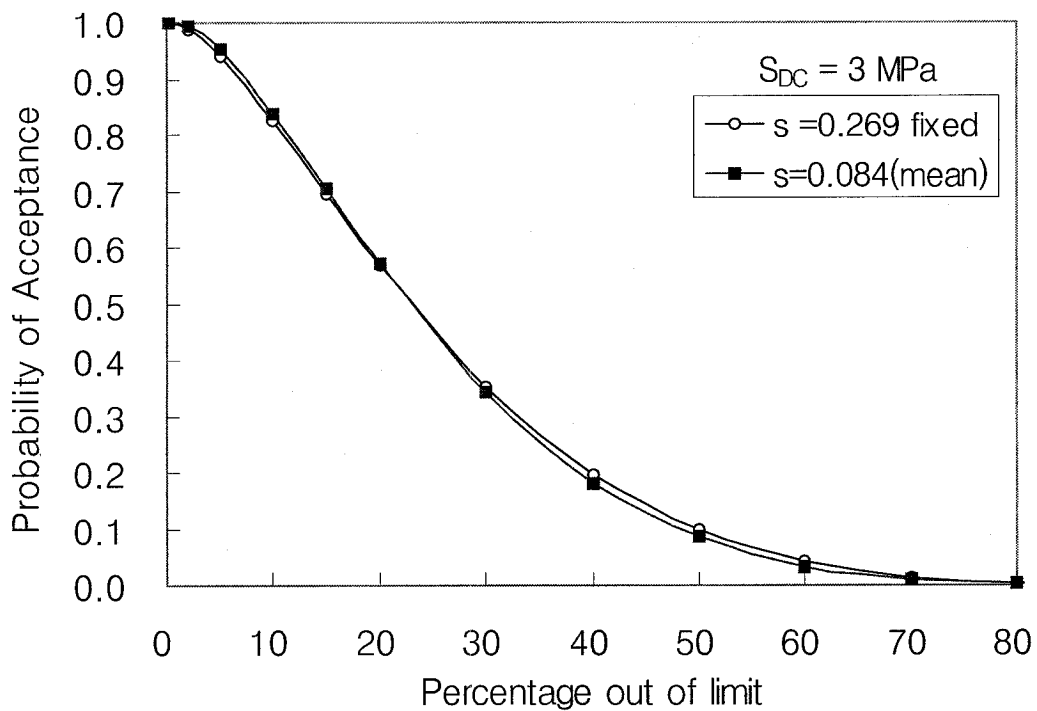


그림 3.97. 일반도로용 혼합물의 불량률(percentage out of limit)을 기준으로 표준편차를 두 가지로 계산하여 합격확률을 나타낸 OC curves.

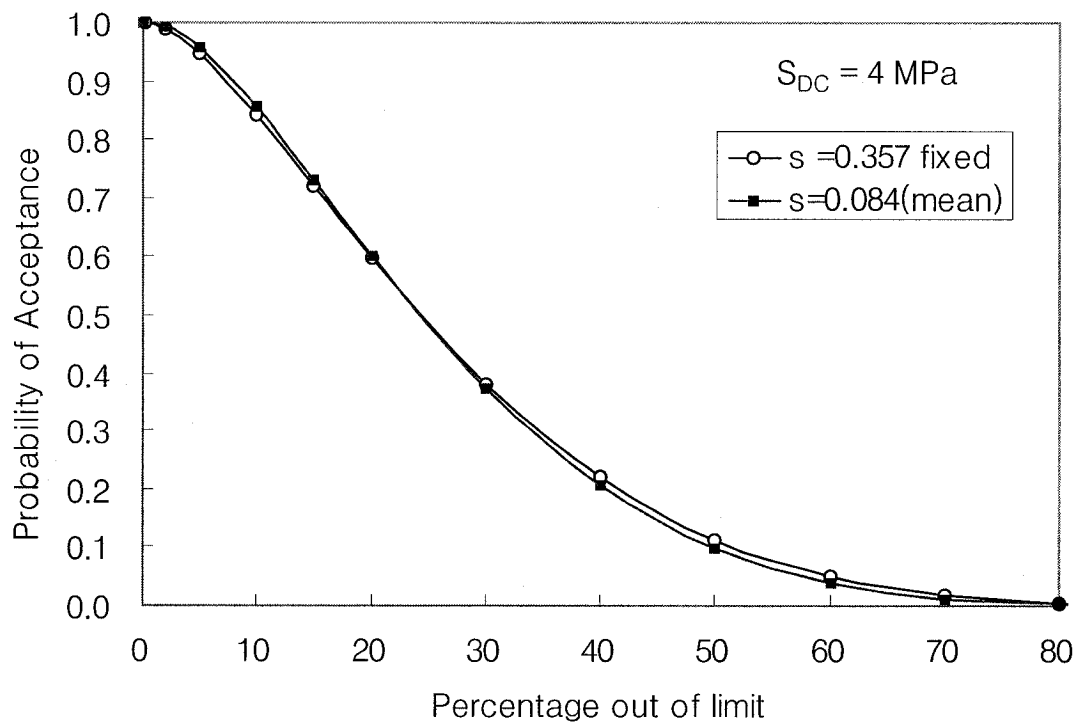


그림 3.98. 간선도로용 혼합물의 불량률(percentage out of limit)을 기준으로 표준편차를 두 가지로 계산하여 합격확률을 나타낸 OC curves.

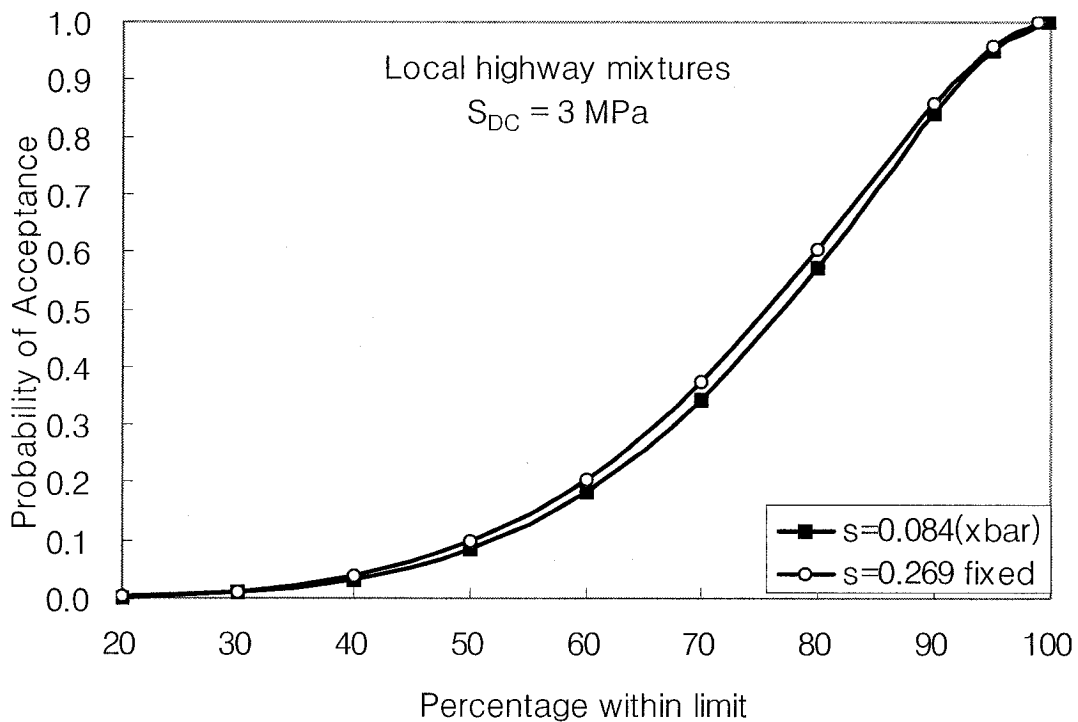


그림 3.99. 일반도로용 혼합물의 양호율(percentage within limit)을 기준으로 표준편차를 두 가지로 계산하여 합격확률을 나타낸 OC curves.

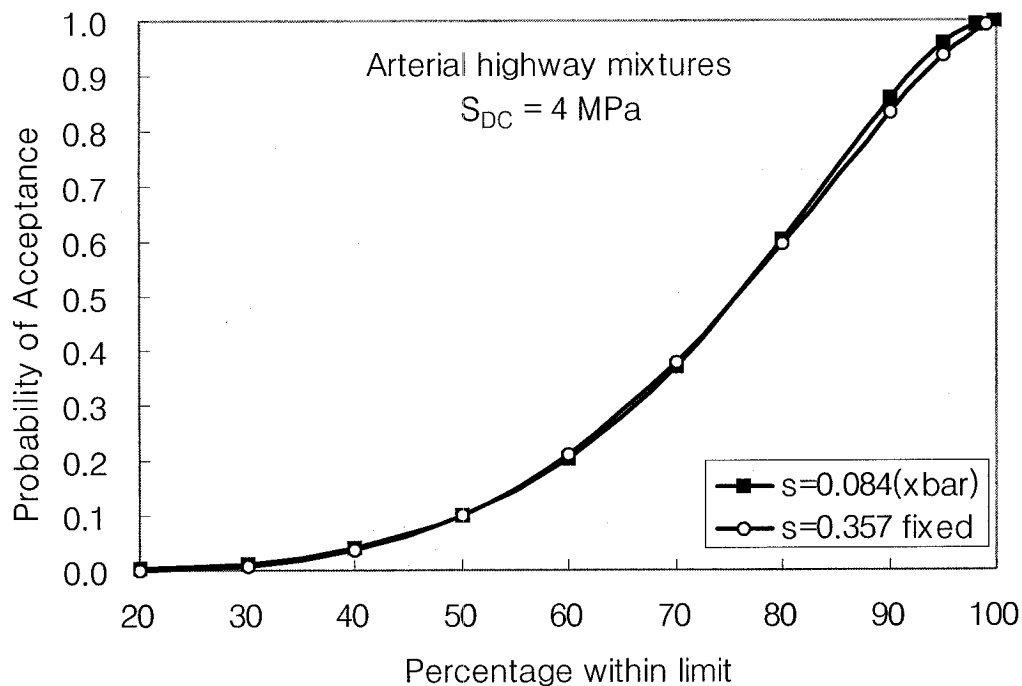


그림 3.100. 간선도로용 혼합물의 양호율(percentage within limit)을 기준으로 표준편차를 두 가지로 계산하여 합격확률을 나타낸 OC curves.

그림 3.101~3.102는 일반도로용 혼합물과 간선도로용 혼합물의 합격확률을 나타내는 OC곡선이다. 이 곡선은 모두 표준편차를 0.84m으로부터 산정하여 그린 것이다. 그림에서 보듯이 간선도로용 혼합물의 합격률이 두 가지 방식의 그림에서 모두 다소 높게 나타남을 알 수 있다. 특히 곡선의 중간부분에서 그 갭이 더 커서 차이가 더 크게 나타나나 실제 품질관리 수준인 POL = 10% 부근에서는 그 차이가 매우 작다. 또한 이와 같이 품질관리를 할 경우 합격확률이 90% 이상을 유지하려면 POL이 약 8% 수준을 유지해야 가능할 것이다. 이는 생산되는 혼합물 모집단 변형강도의 약 92% 이상이 임계치 (일반도로 3.0, 간선도로 4.0)를 넘어야 실제 합격률이 90% 이상이 된다는 의미이다. 반면에 혼합물 모집단 변형강도의 약 20% 이상이 임계치보다 낮으면 (POL>20%) 합격확률은 약 50% 대로 낮아진다. 따라서 이렇게 S_D 로 그린 검사특성 곡선(그림 3.94)을 통해보면 배합강도가 3.2 MPa 이상이 되도록 생산하면 혼합물이 양호율(PWL)은 90% 수준이 되며 이것이 품질관리에서 합격될 수준은 약 85% 정도 됨을 알 수 있다 (그림 3.102).

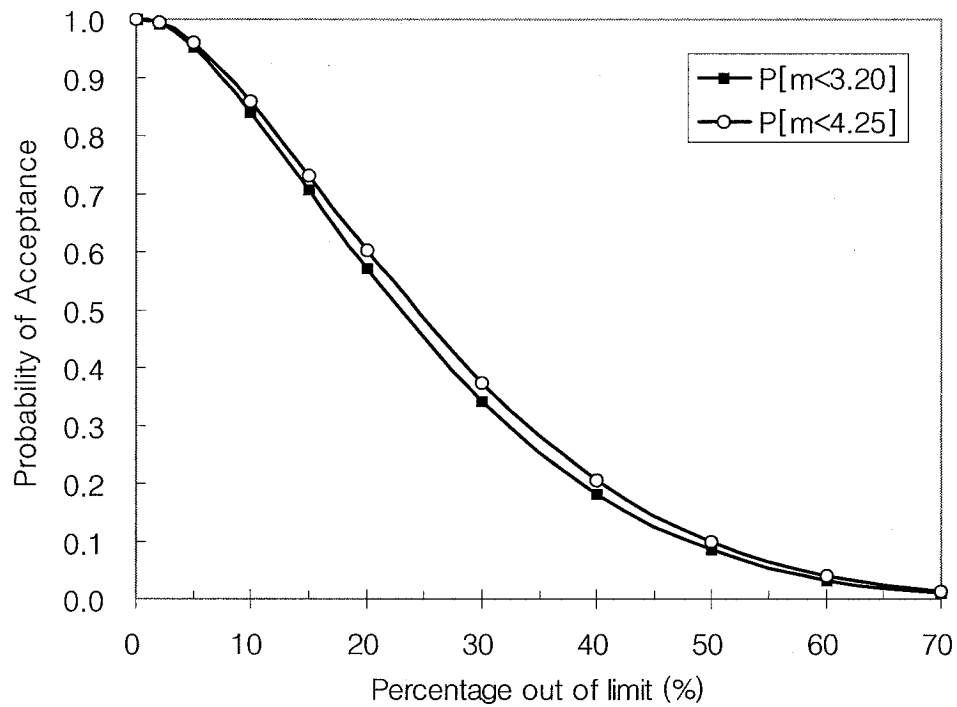


그림 3.101. 일반도로용 혼합물과 간선도로용 혼합물의 불량률 (percentage out of limit)을 기준으로 합격확률을 나타낸 OC curves.

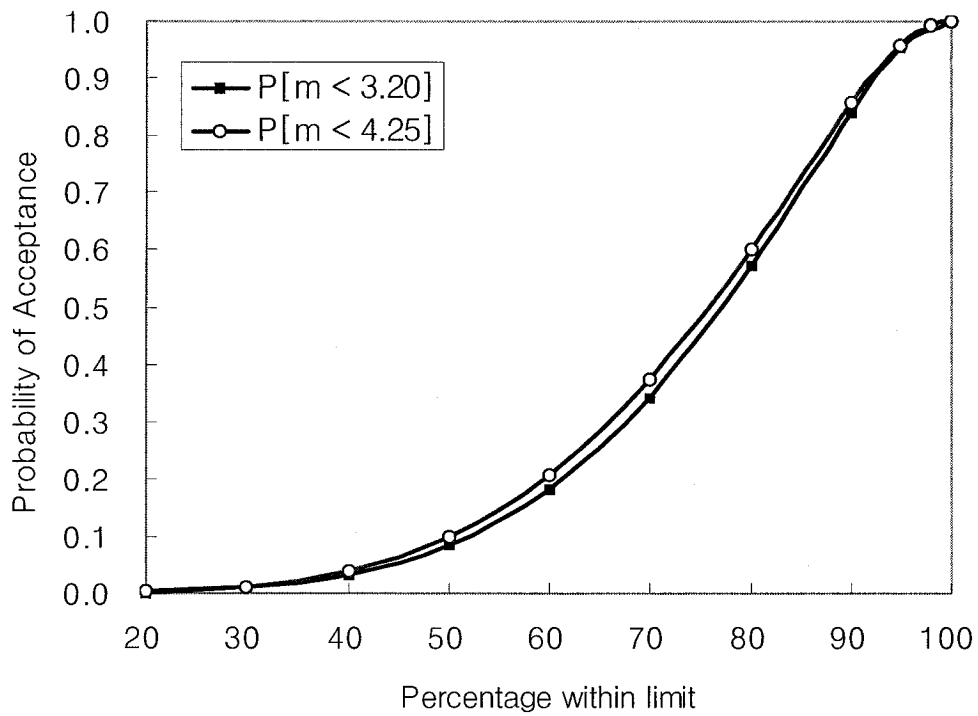


그림 3.102. 일반도로용 혼합물과 간선도로용 혼합물의 양호율 (percentage within limit)을 기준으로 합격확률을 나타낸 OC curves.

바. 배합강도의 결정

상기의 통계적 기법을 통해 결정 제시된 배합강도가 검사특성곡선을 통해 충분히 통계적 타당성이 있음을 확인하였다. 한편 이는 재하속도 30mm/min의 기준이므로 이를 국내에 많이 보급된 마샬안정도 시험기의 50mm/min 속도의 장비로 측정할 경우에는 전체적으로 더 높은 값이 얻어지므로 이를 다시 조정하여야 한다(아스팔트... 2007).

그간의 연구에 의하면 이 차이는 일반혼합물의 경우 약 10%, 개질혼합물의 경우는 약 6%정도 높게 얻어지므로 이를 고려하면 공시체 직경 100mm 일반도로용 혼합물은 10% 증가시켜 임계치 3.2MPa, 배합강도 3.5MPa, 간선도로용 혼합물은 6% 증가시켜 임계치 4.25MPa, 배합강도 4.5MPa 이상이어야 한다.

또한 150mm 공시체를 사용할 경우 혼합물의 변형강도는 더욱 크게 나타난다. 따라서 150mm 공시체 사용에 따른 보정치, 재하속도에 따른 보정치를 다 고려한 연구에서 아래 표와 같은 결과를 얻었다(한국형... 2008). 한편 두께에 따른 보정, 코어공시체의 제조공시체에 대한 보정 등을 향 지속적인 연구에 의해 수행하여야 할 것이다.

표 3.30. 재하속도별 공시체 직경별 배합변형강도 평균의 최소치 기준

재하속도 (mm/min)	도로 등급	확률 0.1에 대한 z값	임계치 (MPa)	공시체 직경별 배합강도 평균값 (m) 계산치 및 제안치 (MPa)			
				100mm		150mm	
				계산치	제안치	계산치	제안치
30	일반	-1.28	3.00	3.19	3.20	3.58	3.60
	간선	-1.28	4.00	4.26	4.25	4.78	4.80
50	일반	-1.28	3.30	3.52	3.50	3.94	3.90
	간선	-1.28	4.25	4.53	4.50	5.07	5.10

이 값을 정리한 배합설계 잠정치침은 표 3.31와 같다. 이는 표층에 대한 것이며 기층 및 중간층에 대한 기준도 같은 방식으로 잠정 지침(한국형... 2008)에 제시되었다.

표 3.31. 표층용 가열 아스팔트 혼합물의 시험 기준 값

혼합물의 특성치		아스팔트 혼합물의 종류	
		SC-1, SC-2 SC-3, SC-4	SC-5, SC-6
다짐회수별 변형강도 (MPa)	75(50)회	3.20	
	100(75) 회	4.25	

【주1】 SC= Surface course

【주2】 표의 변형강도 값은 직경 100mm 아스팔트 혼합물 공시체를 60°C 물에 30분간 수침후 꺼내어 바로 30mm/min의 재하속도로 측정한 3개 공시체 측정치의 평균이다.

【주3】 대형차 교통량 1일 한 방향 1000대 이상, 또는 20년 설계 ESAL > 10^7 인 경우인 중 교통도로 포장에서는 선회다짐 100회, 그 미만 도로에는 선회다짐 75회를 사용하며, 마살 다짐의 경우 각각 양면 75회와 50를 사용할 수 있으며 ()에 나타내었다.

9. 품질관리에의 적용성 평가

아스팔트 포장은 포설후 수일 내에 다짐도, 두께, 아스팔트 함량 및 골재 입도 등의 품질검사를 위해 현장에서 코어를 채취한다. 이때 강도특성 관련 치에 대한 검사는 수행하지 않는다. 왜냐하면 안정도나 간접인장강도 등이 모두 공시체 측면에 힘을 가해 구하는 특성치인데 그 측면이 코어비트에 의해 손상이 가서 완전한 직선을 이루지 못하기 때문에 공정한 강도치가 얻어지지 못하기 때문이다.

변형강도는 공시체의 표면에 하중을 가하여 측정하므로 안정도나 간접인 장강도와 달리 현장포설 후 품질검사를 위해 채취한 공시체로도 측정이 가능하다. 실제 본 연구에서는 그림 3.16, 3.39-3.49에서와 같이 코어를 채취하여 변형강도를 측정하였으므로 변형강도를 품질검사의 한 항목으로 추가하여 활용할 수 있는 가능성을 확인하였다.

하지만 SMA나 배수성은 물론 밀입도 혼합물도 코어 채취시 수압 및 코어비트의 영향으로 코어 공시체의 변형강도가 낮아진다. 따라서 같은 혼합물로 실험실에서 제조한 공시체의 변형강도를 기준으로 설정한 배합강도(표 3.31)의 값을 그대로 적용할 수는 없다.

또한 앞선 연구에서 보듯이 실험실에서 배합설계시 결정된 공극률 4%를 기준으로 제조한 혼합물도 코어 공시체의 변형강도는 선회다짐 제조공시체보다 확연히 낮다. 그런데 현장 포설 초기의 혼합물은 밀도가 배합설계치보다 낮아 공극률이 훨씬 높다. 현장다짐을 배합설계 밀도의 96%를 허용치로 할 경우 공극률 7.8%가 합격 범위기준이다. 전년도 연구에서 공극률과 변형강도의 관계에서 알 수 있듯이 공극률이 높으면 변형강도도 낮다.

따라서 도로포장 포설후 초기에 현장에서 품질검사를 위해 채취한 공시체는 공극률과 코어 채취시 수압의 영향 등 2 가지요인 때문에 배합강도보다 낮은 값을 보일 것이다. 하지만 그 정도가 얼마인지는 본 연구에서의 범위에 포함되어있지 않다. 따라서 그 가능성은 확인 하였지만 도로 등급별 S_D 합격치의 설정을 위해서는 이 두 가지 요인에 따른 강도저하 값을 통계적으로 정량화하여 결정하여야 할 것이다.

10. 종합 고찰

이제까지 3년간의 연구에 의하면 아스팔트 포장에 발생하는 소성변형 저항성의 추정을 위해 아스팔트 혼합물에 대한 변형강도 시험 [Defromation strength (S_D) test 또는 일명 Kim Test]은 효율적인 것으로 판단된다. 왜냐하면 S_D 는 기존에 널리 사용되는 wheel tracking과 APA 시험 결과와 매우 상관관계가 높을 뿐만 아니라 S_D 가 높은 혼합물로 포설된 포장에서는 침하깊이가 상대적으로 낮게 나타나는 것을 현장모의주행(FCWT)시험에서 확인하였다. 또한 실제 도로에서 포장에 소성변형이 깊은 지역과 낮은 지역에서 코어채취를 통한 S_D 의 측정결과 침하가 낮은 지역의 S_D 가 높게 나타나는 것도 확인하였다. 따라서 S_D 는 아스팔트 혼합물 재료의 소성변형 특성을 잘 나타내는 좋은 공학적 특성치로 판단된다.

단, 본 시험은 혼합물의 압축과 전단 유발을 통한 재료의 저항성을 측정하므로 가능한 재료가 균질(Homogeneous)에 가깝고 등방성(Isotropic)일 수록 측정치가 균일하게(변동성이 적게) 나타난다. 따라서 일반적으로 사용되는 밀입도 아스팔트 혼합물에 대해서 매우 안정적인 측정 결과를 나타내며 비균질 일수록 변동성이 커진다. 그러므로 본 S_D 측정 방법 및 그 값은 밀입도 아스팔트 혼합물의 배합설계 및 배합강도 규정에 적용되도록 국토해양부의 지침에 도입되었다.

밀입도가 아닌 SMA 등 골재 골격으로 하중지지를 하는 특수 아스팔트 콘크리트의 경우도 소성변형 저항성의 강약에 따른 S_D 의 경향은 어느 정도 나타난다. 하지만 절대값은 밀입도에 적용되는 방법대로 하면 매우 낮게 나타난다. 특히 공시체의 크기가 100, 150mm에서 13mm SMA의 경우 그림 3.103과 104와 같이 하중이 가해지는 동안 곡선이 튀는 현상이 자주 나타나는데 이는 골재 골격이 Buckling 되면서 나타나는 현상으로 보인다. 그리고 슬래브 공시체에서도 가끔 나타났지만 이러한 현상이 10mm 골재에서는 거의 없어 특이한 점이라 할 수 있다.

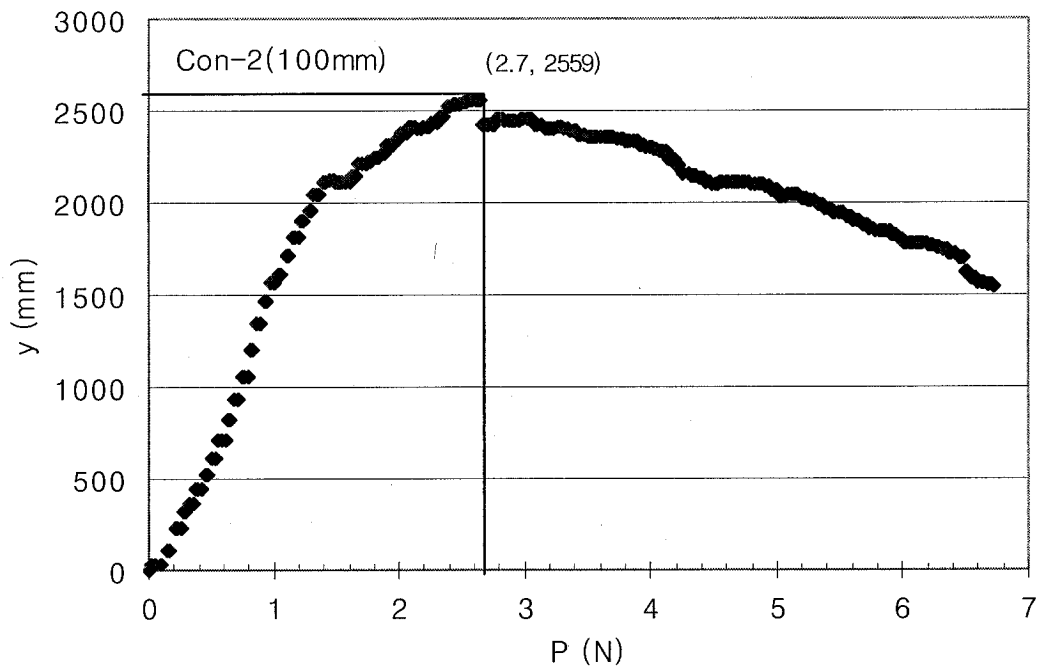


그림 3.103. 13mm 하중-변형곡선에서 골재골격(skeleton)의 Buckling 으로 인해 곡선이 튀는 현상 (직경 100mm 공시체)

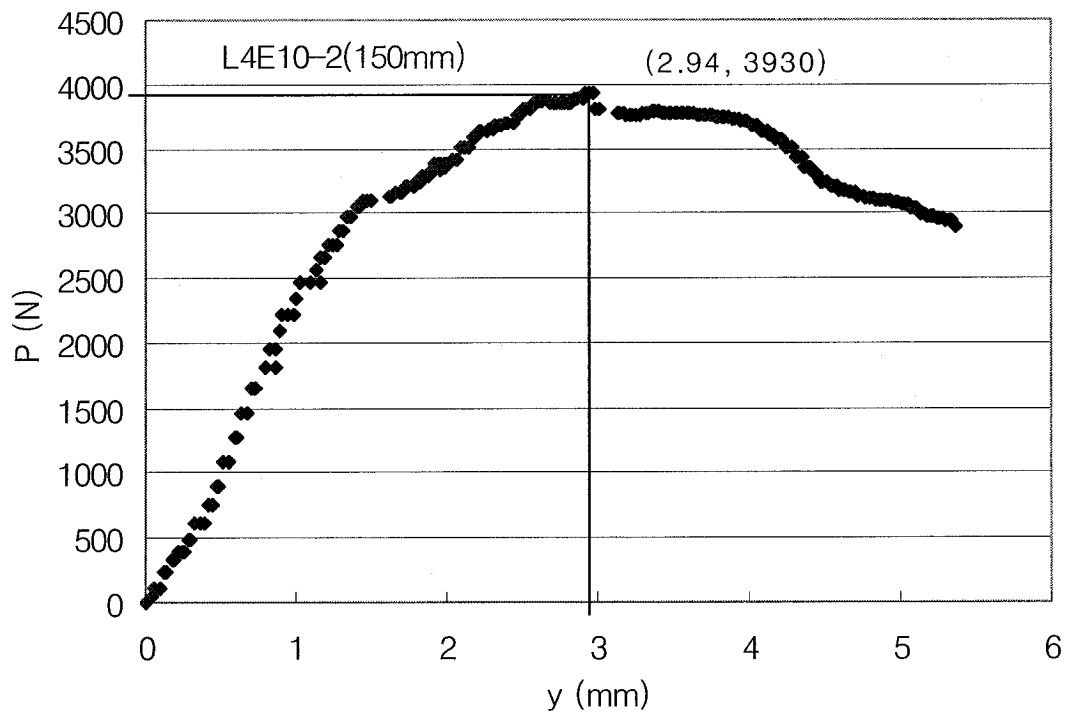


그림 3.104. 13mm 하중-변형곡선에서 골재골격(skeleton)의 Buckling 으로 인해 곡선이 튀는 현상 (직경 150mm 공시체)

따라서 SMA 등 골재 골격으로 하중지지를 하는 특수 아스팔트 콘크리트의 경우는 측방변형을 야기하는 전단응력을 공시체 측면의 저항력으로 구속하도록 공시체 직경을 최대화 할 필요가 있다. 그리고 압축응력은 골재 골격을 이용한 수직응력으로 저항하므로 하중봉 하단의 평면 면적을 더 넓히고 r을 줄이면 수직응력 저항 강도가 더 강한 SMA의 특성이 보다 잘 측정될 것으로 추정된다.

이를 근거로 $D=40\text{mm}$, $r=10\text{mm}$ 하중봉의 r을 $r=5\text{mm}$ 나 그 이하로 줄여 같은 SMA 혼합물을 직경 150mm 공시체와 대각선 길이 312mm인 8각 슬래브를 만들어 추가 시험을 수행하였다. 8각 슬래브 공시체는 초기에 305 x 305mm 슬래브를 제작하여 공시체가 들어갈 수 있는 시험기의 간격 270mm를 한 번으로 하는 정사각형으로 자르고 다시 각을 따는 형식으로 그림 3.105와 같이 제작하였다. 이를 30분간 60°C 물속에 30분간 넣었다가 하중봉이 정 중앙에 오도록 안치하고 30mm/min의 속도로 하중을 가하여 P와 y를 구했다.

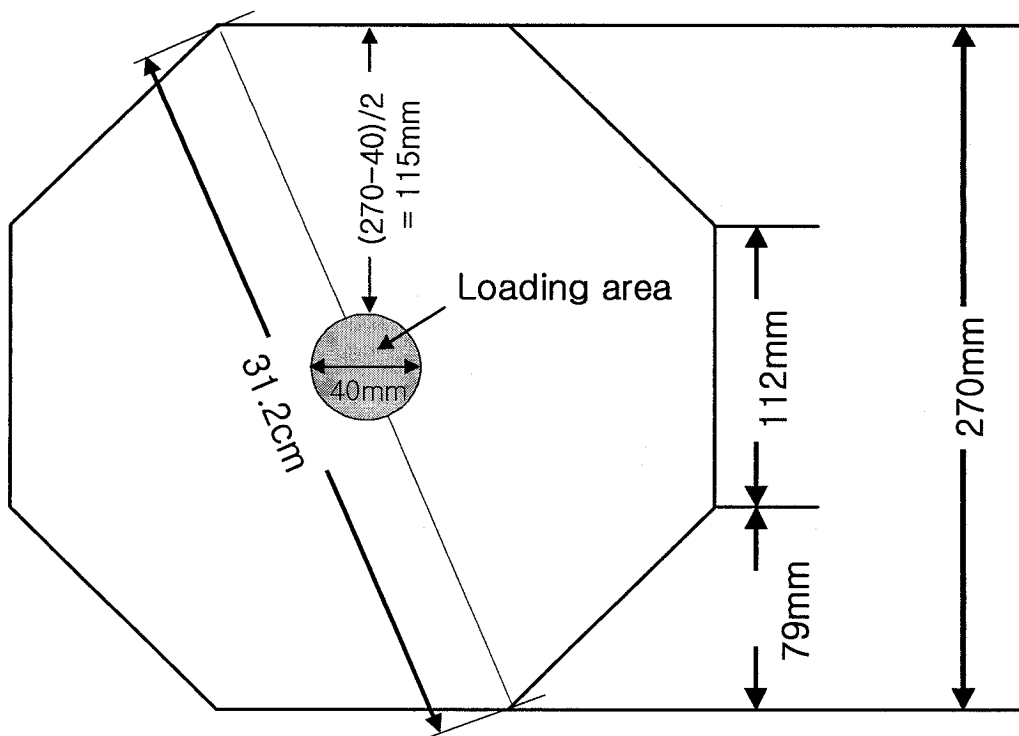


그림 3.105. 슬래브 공시체를 절단하여 만든 8각형 공시체의 치수.

하지만 공시체가 커지면서 최고점에서 Peak가 반복발생하며 찾기가 어려운 현상이 종종 발생하였다. 그림 3.106에서 보듯이 하중의 정점이 몇 번 반복되어 나타나거나 그림 3.107과 같이 양 봉이 나타나는 현상이 대표적인 것이다. 이는 8각 슬래브가 중앙의 하중재하 면적(직경 40mm 원)보다 공시체 측면의 가장 짧은 쪽이 115mm로 충분히 길어 100mm나 150mm 공시체보다 측방 구속이 커서 나타나는 현상이다.

즉, 일반적으로 파괴를 통한 강도시험은 일정하중 이상에서 공시체의 지지력이 한계에 달하면 균열이 발생하며 붕괴(Rupture) 현상이 일어나야 한다. 그러나 본 실험은 고온에 유동성이 있는 재료이며 측면 구속력이 유지되고 있으므로 정점 이후에도 지속적으로 어느 정도 하중을 지탱하다가 골재 골격이 다시 맞물리면 일시적으로 또 지지력이 증가되기 때문에 나타는 현상이라 할 수 있다.

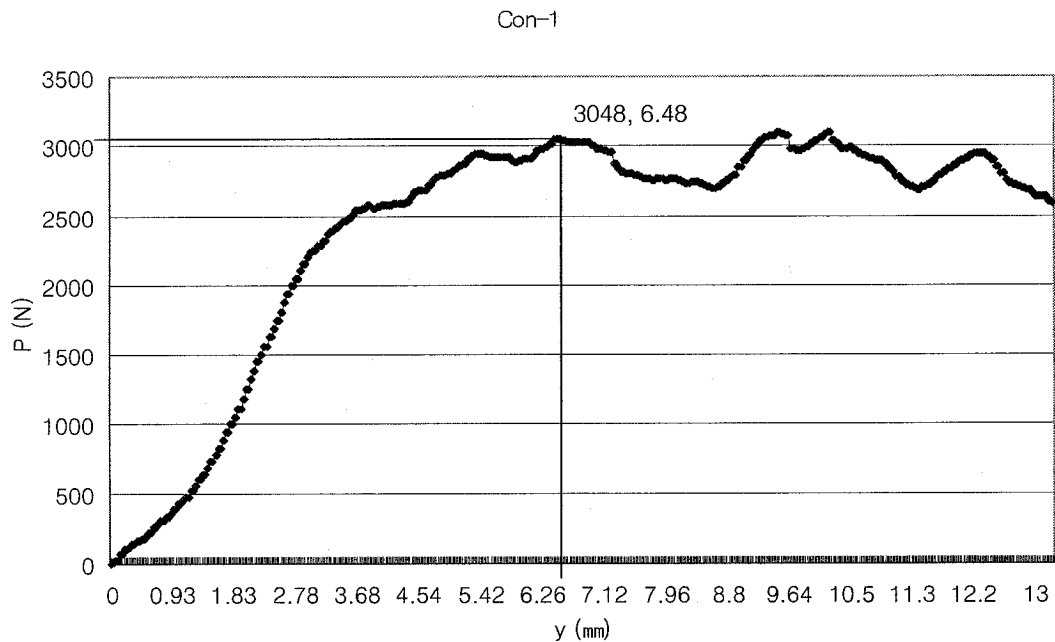


그림 3.106. 8각 슬래브 공시체에 대한 변형강도 시험에서 정점의 반복 현상 (13mm AP5 SMA)

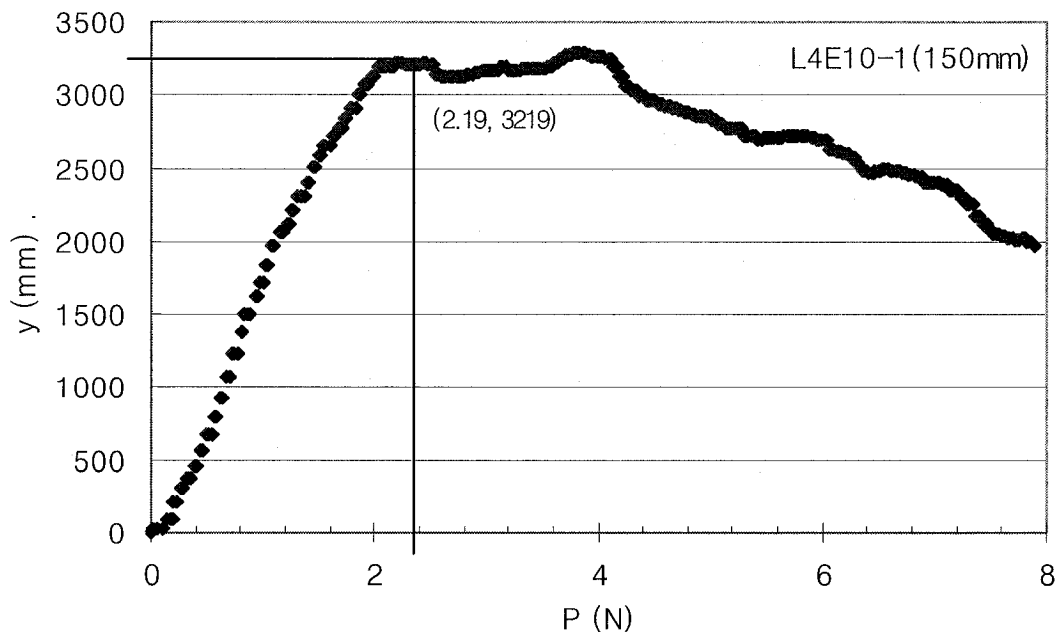


그림 3.107. 8각 슬래브 공시체에 대한 변형강도 시험에서 2 정점 현상
(13mm L4E10 SMA)

기 연구된 S_D 시험의 파괴양상 분석(김광우 등 2004, 2004b)에 의하면 공시체 편칭전단 응력에 의해 사면 균열이 약 45° 로 발생하는 것으로 관찰되었다. 그러므로 두께가 63mm 전후이면 이를 저항하는 필요한 공시체 직경은 160mm 이상이다. 즉, S_D 시험에서 균열이 그림 3.108과 같이 발생하고 그 발생하는 폭은 그림 3.109와 같이 재하단면 가장자리부터 공시체의 유효 높이 (높이가 63mm이나 침하를 고려하여 $d=60$ mm 정도로 가정) 이므로 공시체 전체의 직경은 $40+(2 \times 60) = 160$ 이다. 따라서 본 실험에서 8각 슬래브의 크기는 이를 충분히 넘으므로 지속적 재하로 켜기 현상에 의해 어느 한쪽으로 균열이 발생되기 전까지는 정점이 반복되는 현상이 나타나는 것이라고 판단된다.

하지만 이에 대해서는 향후 더 깊은 연구가 있어야 할 것으로 보인다. 그리고 본 실험에서는 우선 이런 경우 최초의 정점으로 인식되는 점을 찾아 그때의 P 와 y 로 S_D 를 계산하였으며 그 결과를 그림 3.110에 나타내었다. 이를 통해 S_D 값이 100mm 공시체보다 40%까지 높아지는 것을 알 수 있었다.

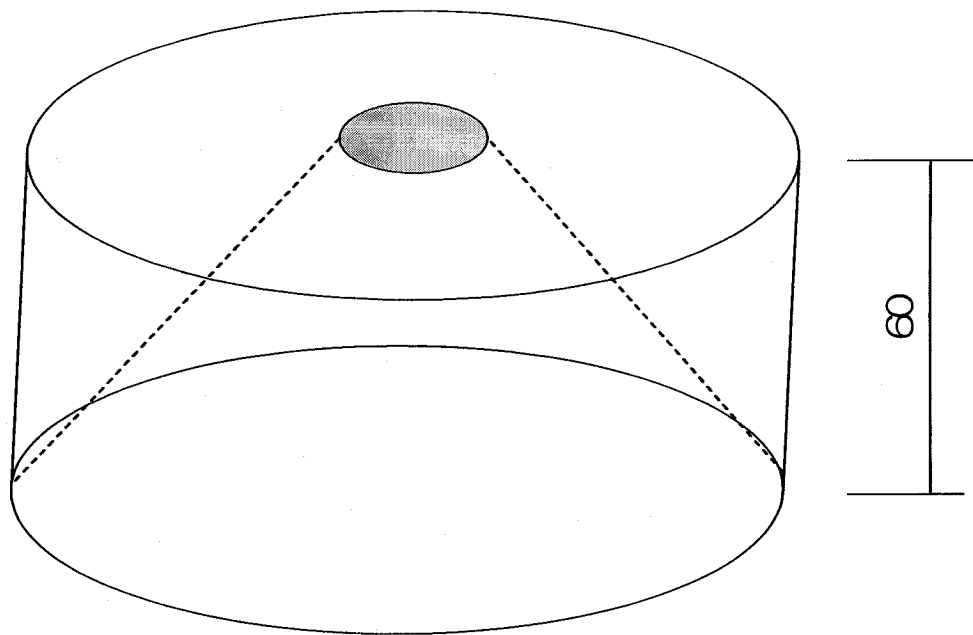


그림 3.108. 변형강도 시험에서 관찰된 밀입도 공시체가 편칭 전단에 의해 파괴되는 사면의 모식도 (유효 높이 60mm로 가정)

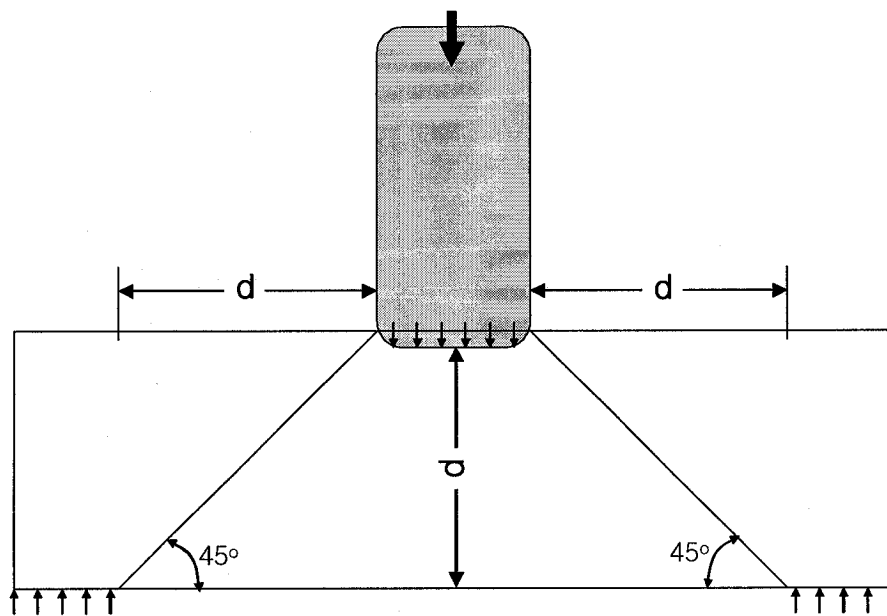


그림 3.109. 변형강도 시험에서 편칭 전단에 의한 파괴 시의 하중봉과 공시체의 유효두께로부터의 공시체 소요 직경 모식도.

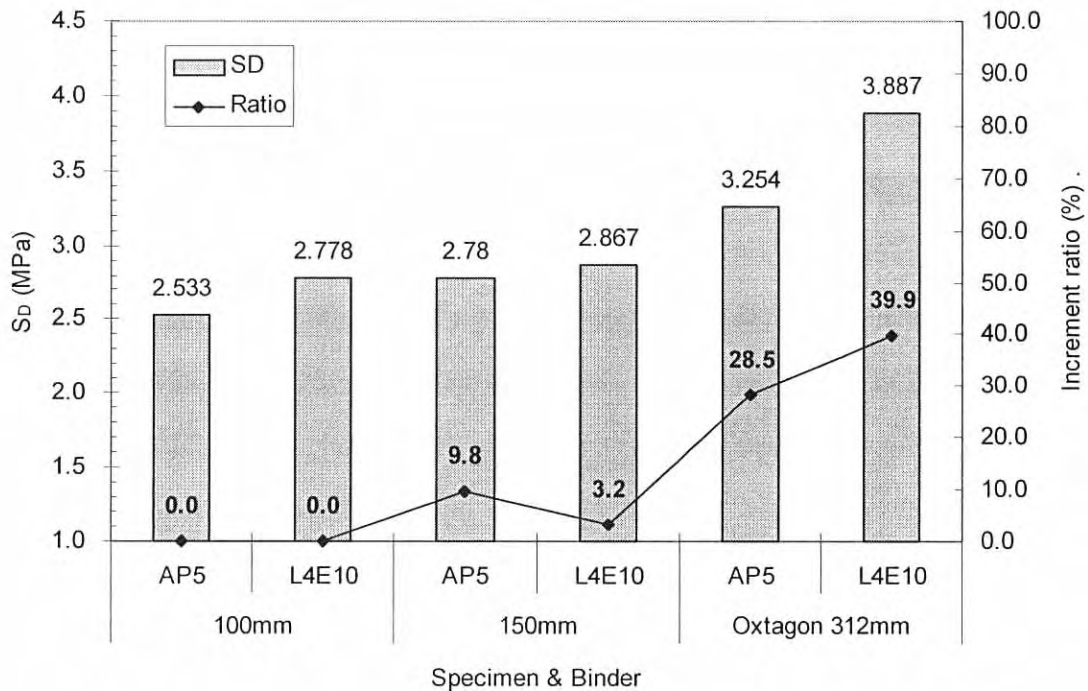


그림 3.110. 3가지 공시체를 사용한 변형강도 시험 결과 및 그 증가율 비교

그림 3.111부터 3.115까지는 공시체의 파괴양상을 보여준다. 우선 그림 3.111의 150mm 공시체는 측면이 심하기 균열이 발생되며 파괴된 모양이다. 반면에 그림 3.112의 8각 공시체 파괴전의 모양은 시험 후 최단 변 중 한 방향으로 균열이 발생하고 파괴된 모양을 그림 3.113에서 보여준다. 또한 그림 3.114의 8각 슬래브 파괴전의 공시체는 시험 후 표면으로는 거의 균열이 안 보이나 뒤집어 보면 바닥면의 최단 변 중 한 방향으로 균열이 발생하고 파괴된 모양을 그림 3.115에서 보여준다.

이렇게 관찰되었듯이 슬래브 8각 공시체는 측면 구속이 커서 공시체가 파괴되는데 정점이 불확실한 경우가 많으나 최초 정점에 가까운 점을 취해 S_D 를 계산할 경우 그림 3.110과 같은 결과를 얻은 것이다. 이 경우 후반부 정점은 불필요한 것이므로 공시체의 크기를 좀 더 작게 할 수 있을 것이다. 하지만 여전히 그 절대값은 밀입도 혼합물에 비해 낮은 편이다. 이는 측면 구속의 부족이 원인이 아닌 것으로 보여지므로 r 을 더 줄여 바닥의 각부의

날카로운 부분만 원형으로 갈아($r = 1\text{mm}$) 추가 실험을 해보면 보다 다른 결과를 얻을 수 있을 것으로 보여진다.

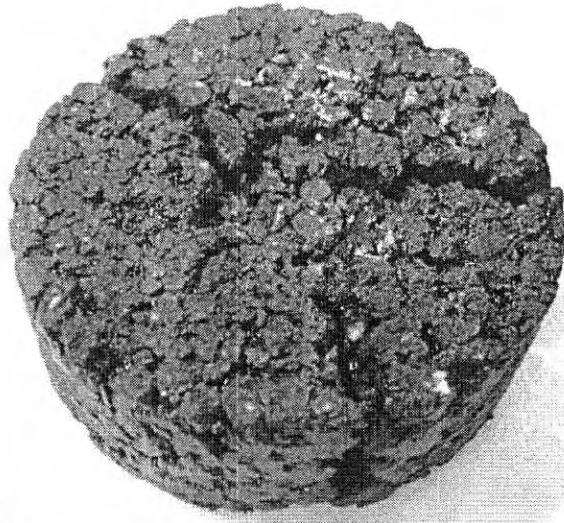


그림 3.111. 직경 150mm, 13mm 골재 SMA 공시체의 파괴모양

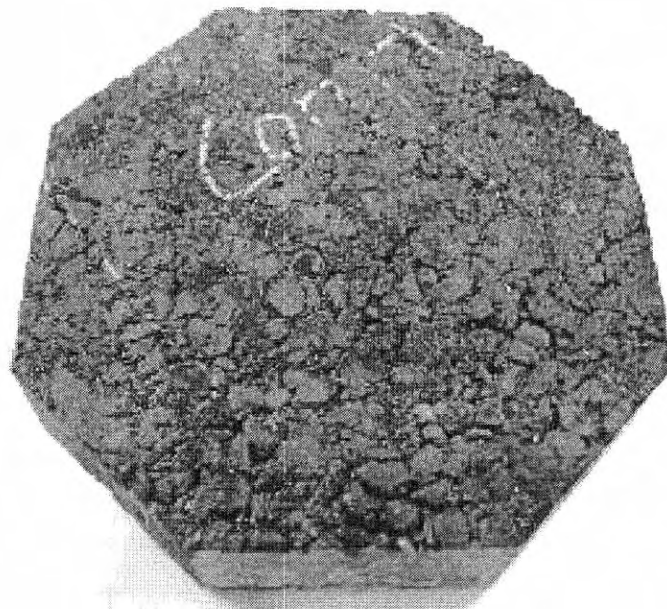


그림 3.112. 대각선 312mm인 13mm 골재, AP5 SMA 8각 공시체의 모양

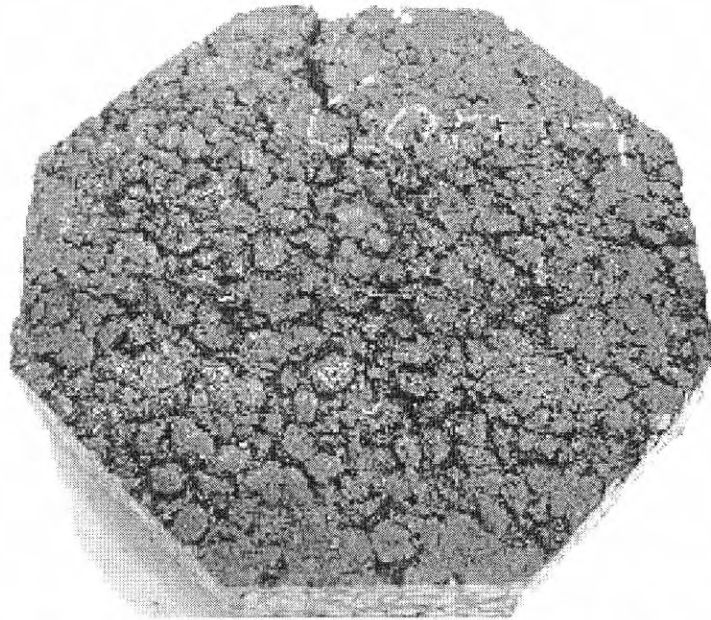


그림 3.113. 대각선 312mm인 13mm 골재, AP5 SMA 8각
공시체의 파괴된 모양

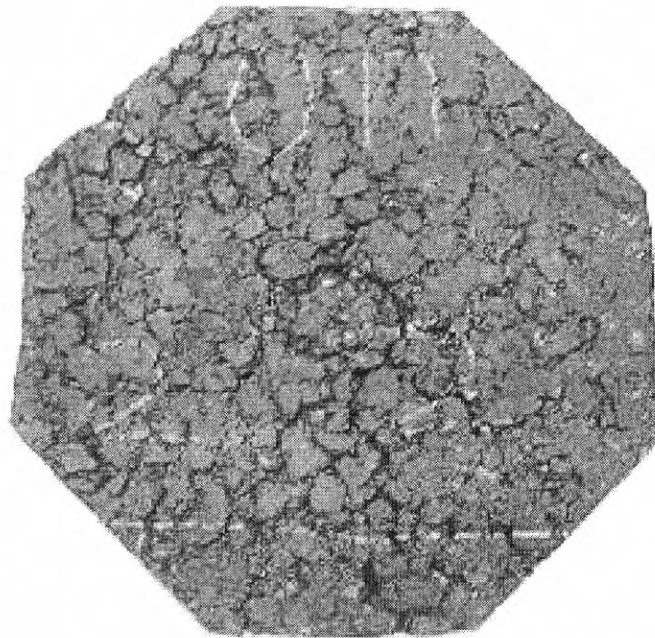


그림 3.114. 대각선 312mm인 13mm 골재, AP5 SMA 8각
공시체의 표면 균열이 거의 없이 파괴된 모양

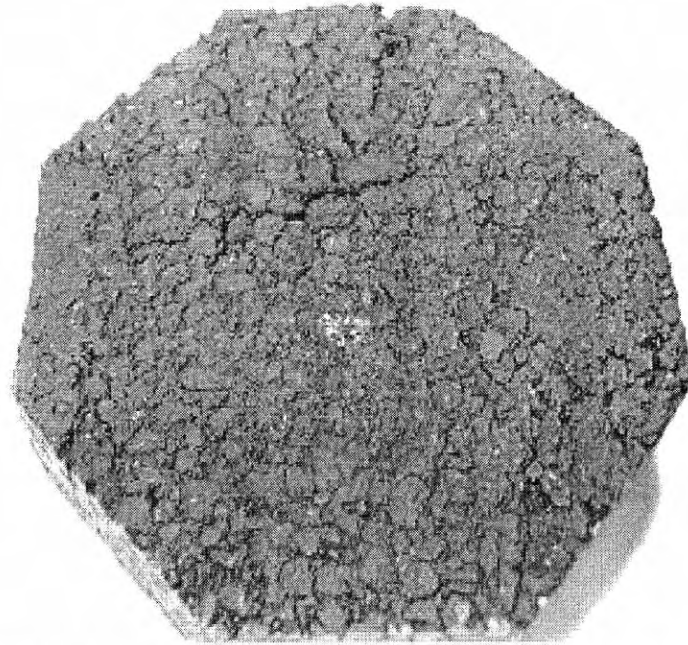


그림 3.115. 상기 그림 3.114 공시체의 표면 균열은 거의 없으나 바닥에 균열로 파괴된 모양

이상의 고찰을 통해 볼때 향후 SMA 등 특수 아스팔트 콘크리트의 변형 강도 적용을 위해서는 보다 다양한 형태의 하중 재하기구, 다른 재하 속도 및 공시체 치수를 사용한 추가 연구가 필요한 것으로 사료된다. 즉, 본 연구의 목적은 본래 밀입도 아스팔트 포장에 만연하는 소성변형을 보다 효과적으로 제어하기 위하여 변형강도 시험법을 개발하는 것이었으므로 SMA 등 특수혼합물을 위해서는 향후 가칭 “특수혼합물의 특성평가 기법 개발”과 같은 별도의 연구가 필요하다.

11. 결과 요약 및 결론

3차년도 연구의 결과를 요약하고 중요한 결론을 정리하면 다음과 같다.

- ▶ 60°C로 수침처리 후 변형강도 유지비(Retained Strength Ratio: RSR)로 보면 48시간 수침처리가 보다 적합하다고 판단되며, 변형강도 시험은 수침으로 취약해진 혼합물의 특성을 비교적 잘 나타내는 시험법임을 알 수 있다.
- ▶ 하지만 48시간 수침처리 후 취약해진 혼합물의 특성을 Wheel tracking (WT)으로는 입증이 어려워 향후 별도의 검증과정을 통해 이를 증명하기 전에는 변형강도에 의한 수분취약성 시험의 실제 적용은 보류해야할 것으로 판단된다.
- ▶ 보다 강한 WT 운하중의 적용이나 간접인장강도에 의한 수분취약성 평가와 병행하여 RSR의 합격비율 선정 연구가 필요할 것으로 판단된다.
- ▶ 전체적으로 SMA 혼합물은 모두 밀입도 혼합물의 기준을 훨씬 못 미치는 낮은 변형강도 값을 나타내었다. 따라서 변형강도를 사용한 SMA 혼합물의 평가는 밀입도와 비교시 균형 있는 평가가 되지 못한다고 판단된다.
- ▶ WT 시험 또한 SMA를 제대로 평가하지 못하는 시험법으로 판단되므로 WT와 S_D 의 상관성 분석도 큰 의미가 없다고 판단된다. 즉, 실제도로에서 SMA의 우수성과 비교시 WT 시험 결과도 밀입도 보다 좋지 못해 S_D 는 물론 WT 시험도 SMA의 소성변형 저항성을 평가하는데 문제가 있음을 확인하였다. 따라서 향후 보다 깊은 연구를 통해 SMA를 평가하는 방법의 개발이 필요해 보인다.
- ▶ 배수성 혼합물 및 미국 OGFC (Open-graded friction course) 혼합물 역시 SMA와 마찬가지로 S_D 값이 매우 낮아 밀입도와 비교시 변형강도로 그 특성을 평가하기 힘들었다. 이 역시 혼합물의 구성이 주로 굵은골재로 이루어져 바인더의 특성보다는 골재의 골격으로 하중을 지지하기 때

문이다.

- ▶ 배수성 혼합물의 실제 도로 포설이 어려워 원형모의주행 시험피트에 배수성 혼합물을 포설하고 주행시험을 수행하고 침하깊이와 코어를 채취하여 S_D 를 측정하였다. 침하깊이는 혼합물간의 차이를 비교적 잘 나타냈으나 코어 채취시 매우 낮은 S_D 를 보였고 두 가지 변수간의 상관관계도 낮았다.
- ▶ 이러한 점을 토대로 밀입도 혼합물의 경우와 함께 고려한다면 변형강도 시험법은 재료가 Homogeneous 할 수 록 더 효과적인 시험법이라 할 수 있다. 따라서 특수혼합물의 경우 전반적으로는 절대 값이 너무 낮아 SMA 및 배수성 혼합물의 변형강도만으로 소성변형의 저항성을 측정하는 데는 한계가 있다.
- ▶ 밀입도의 경우 굵은골재가 매트릭스 사이에 있어 전단으로 밀려도 균질의 재료처럼 일률적으로 변형이 일어나나, SMA 등은 다짐시 주력방향인 수직으로 형성된 골격의 일부 골재가 전단으로 밀려 이탈되면서 취약해지는 것으로 추정된다. 이것이 유사한 wheel tracking (WT) 결과를 보이는 밀입도 혼합물에 비하여 전반적으로 S_D 가 낮은 원인일 것이다.
- ▶ 하지만 변형강도(S_D) 시험법 자체는 10mm SMA의 결과를 통해 볼 때 SMA 재료의 소성변형 저항성을 상대적으로 측정할 수 있는 어느 정도 유효한 방법임을 보인다. 즉, 골재치수가 작을수록 재료가 등방으로 균일하게 배열되므로 밀입도의 경우와 함께 고려한다면 S_D 시험은 재료가 Homogeneous 할 수 록 더 효과적이라 할 수 있다. 단, SMA의 재료 구조적 특성상 전반적으로는 값이 낮고, 또한 WT도 마찬가지로 SMA의 특성을 제대로 반영하지 못하므로 특수 아스팔트 혼합물에 대한 측정 방법은 전체적으로 별도의 체계적인 연구가 필요하다고 사료된다.
- ▶ 이를 위해 SMA 등 골재 골격으로 하중지지를 하는 특수 아스팔트 콘크리트의 경우는 측방변형을 야기하는 전단응력을 공시체 측면의 저항력으로 구속하도록 공시체 직경을 최대화 할 필요가 있다. 그리고 압축응력

은 골재 골격을 이용한 수직응력으로 저항하므로 하중봉 하단의 평면 면적을 더 넓히고 r 을 줄이면 수직응력 저항 강도가 더 강한 SMA의 측정이 잘 측정될 것으로 추정된다.

- ▶ 즉, SMA 등 특수 아스팔트 콘크리트의 변형강도 적용을 위해서는 보다 다양한 형태의 하중 재하기구, 다른 재하 속도 및 공시체 치수를 사용한 추가 연구가 필요한 것으로 사료된다. 즉, 본 연구의 목적은 본래 밀입도 아스팔트 포장에 만연하는 소성변형을 보다 효과적으로 제어하기 위하여 변형강도 시험법을 개발하는 것이었으므로 SMA 등 특수혼합물을 위해서는 향후 가칭 “특수혼합물의 특성평가 기법 개발”과 같은 별도의 연구가 필요하다.
- ▶ 3년에 걸쳐 측정한 소성변형과 채취한 코어의 변형강도의 평균값들로 상관관계를 분석 결과 R^2 은 0.71 이상으로 양호한 편이었다. 매년의 위치가 다소 다르지만 코어 변형강도와 해당 위치에서 측정한 소성변형 깊이와의 상관관계는 R^2 이 0.5 이상, 0.76사이에 있는 것으로 나타났다.
- ▶ 이와 같이 현장으로부터 아스팔트 포장 콘크리트의 변형강도는 소성변형이 깊게 들어간 곳과 적게 들어간 곳에 간에 차이가 분명히 나타나며 소성변형이 적은 지역의 변형강도가 높게 나타남을 확인할 수 있었다. 즉, 혼합물의 변형강도가 강한 곳의 포장노면에서는 소성변형 깊이가 상대적으로 낮게 나타남을 확인할 수 있었다.
- ▶ 밀입도 혼합물을 시험포설전 현장을 모사한 FCWT pit에 포설하고 소성변형을 평가하여 필요한 혼합물을 선정하였다. 그 결과 비교용 AP5외에 RL5와 L4E10을 포설재료로 선정하였다.
- ▶ 또한 침하깊이와 S_D 간의 상관관계는 비교적 양호하여 $R^2 > 0.78$ 이었다. 즉, 포설할 당시의 혼합물의 변형강도에 따라 FCWT 시험에서 혼합물의 소성변형 저항성에 분명한 차이가 나타남을 다시 확인할 수 있었다. 또한 코어의 변형강도와 상관관계도 양호한 $R^2 > 0.73$ 으로 나타나 FCWT의 시험이 매우 현실성 있는 좋은 평가방법임을 확인하였다.

- ▶ 밀입도 및 특수 혼합물 평가 결과를 토대로 볼 때 본 연구에서 개발한 모의주행시험장치에 의한 변형강도의 현장 적용성 평가 결과 혼합물별 FCWT에서 소성변형에 대한 강약이 S_D 의 강약과 상관성이 매우 높게 나타남을 알 수 있었다. 따라서 본 연구로부터 FCWT 시험장치를 개발한 것은 향후 아스팔트 혼합물 시험을 위한 큰 성과라 할 수 있다.
- ▶ 본 연구를 통해 변형강도를 품질관리용 코어공시체에 대해서도 측정할 수 있음을 확인 하였지만 포설후 채취한 공시체는 공극률이 높고 코어 채취시 수압의 영향 때문에 배합강도보다 낮은 값을 보이게 된다. 따라서 배합강도를 그대로 적용하는 것은 문제가 있고 S_D 합격치의 설정을 위해서는 이 두 가지 요인에 따른 강도저하 값을 다양한 data를 이용하여 통계적으로 정량화하여 결정하는 상당한 연구가 뒤따라야 할 것이다.
- ▶ 선행 연구에서 등급별 도로포장 아스팔트 혼합물의 변형강도 임계치가 제시되었다. 하지만 변동성이 존재하므로 평균이 임계치와 같으면 통계적으로 볼때 50%는 불량한 혼합물이 된다는 의미이다. 따라서 임계치 이하로 내려가는 확률을 줄이기 위해 배합설계시의 변형강도(배합강도 또는 공정평균: Process mean)를 더 높여야 하며, 이 기준을 설정하는 연구를 수행할 필요성이 있음을 확인하였다.
- ▶ 아스팔트 혼합물(100mm 공시체)의 평균 변동계수(V_c)는 8.4(%) 이었다. 따라서 $V_c = 8.4\%$ 로 하면 표준편차 $s = 0.84m$ 이고, 소비자 위험률 10%(0.1)를 임계치에서 벌어날 확률로 정하고 정규분포 표에서 $z_{0.1} = -1.28$ 과 공시체 수 $n=3$ 을 이용하여 일반도로포장용 혼합물과 간선도로포장용 혼합물의 배합강도를 계산하면 3.2MPa과 4.25MPa이 설정되었다.
- ▶ 상기의 배합강도는 재하속도 30mm/min를 기준으로 한 값이다. 만일 마샬 안정도 시험기의 50mm/min 속도로 변형강도를 측정하면 이보다 더 높은 값이 얻어진다. Data에 의하면 그 증가율은 일반혼합물은 10%, 간선도로포장용 혼합물은 6%이며 이를 공시체 직경 100mm 혼합물에 적용하면 일반도로와 간선도로는 각각 3.5MPa, 4.5MPa의 배합강도가 된다.

- ▶ 모든 혼합물은 항상 같은 품질로 생산이 되지 않으므로 편차가 발생하고 이 편차의 정도가 변동계수(V_c)로 나타나며 제조되는 혼합물의 배합강도 (공정 평균: m)도 V_c 에 따라 차이가 나게 된다. 즉, m 을 구하는 식은 V_c 와 n 으로 이루어진 함수로서 같은 공시체 수(n)에서는 V_c 가 증가하면 m 이 증가하고, 같은 V_c 에서는 n 이 증가함에 따라 m 이 감소함을 알 수 있었다.

제 4 장 연구개발 목표 달성도 및 관련분야에의 기여도

1. 연구개발 목표 및 평가의 착안점

가. 연구개발의 최종목표

본 연구의 최종 목표는 아스팔트 혼합물의 고온 내변형성 평가를 위해 변형강도 측정법을 개발하고 이 시험법의 타당성을 현장 공용성과의 상관성 평가를 통하여 표준화된 시험법과 적용범위를 제시하는 것이다.

나. 연구개발결과 평가의 착안점

년도	세부연구목표	평가의 착안점 및 척도
3차년 도	○ 잔류변형강도 비 산정	-수침시간 적용의 적정성 -포화 처리의 적정성
	○ SMA 혼합물의 변형강도 분석	-특수 혼합물 선정의 적정성 -상관성분석 방법의 적정성
	○ 배수성 혼합물의 변형강도 분석	-특수 혼합물 선정의 적정성 -상관성분석 방법의 적정성
	○ OGFC 혼합물의 변형강도 분석	-APA와 S_D 측정의 상관성 분석의 적정성 -혼합물 선정의 적정성
	○ 일반포장 및 시험포장의 공용성과 S_D 의 상관성 연구	-조사대상 포장 구간선정의 적정성 -시험포장 노면상태 조사방법의 적정성 -코어의 S_D 측정 및 상관성 분석의 적정성
	○ S_D 측정 표준시험법 제시 및 품질관리 적용성 평가	-시험법 정립 변수의 선정의 적정성 -배합강도 선정방법의 적정성 -현장품질관리 적용성 평가의 적정성

2. 연구목표의 달성도

가. 연구개발 수행 진도율

연구개발내용	세부추진계획 및 방법												진도(%)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
■ 잔유변형강도 비 선정 -최적의 수침시간 선정 -박리저항성 측정 가능성 유무	—	—	—	—	—	—							100
■ SMA 혼합물의 공용성과 S_D의 상관성 연구 -SMA 혼합물의 실내실험 -SMA 혼합물의 현장 공용성 분석	—	—	—	—	—	—	—						100
■ 배수성 혼합물의 공용성과 S_D의 상관성 연구 -배수성 혼합물의 실내 실험 -배수성 혼합물의 현장공용성 분석	—	—	—	—	—	—							100
■ 시험포장 위치 선정 및 포설 -사전 준비된 재료를 포설하고 노면 상태와 S _D 의 연관성 평가								—	—				100
■ 시험포장의 추적 조사 -시험포설 포장의 품질 확인			—	—	—	—	—						100
■ 모의주행 시험장치에 의한 모의주행시험 및 상관성 분석 -4section에 시험포장 포설 -주행을 통한 재료의 공용성과 S _D 의 상관성 분석				—	—	—	—	—	—	—			100
■ 도로 등급별 S_D 기준치 설정 방안 제시 -일반 혼합물 -SMA 혼합물 -배수성 혼합물			—	—	—	—	—						100

----- 당초계획
 _____ 실적

연개발구내용	추진 일정												진도(%)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
■ 품질관리 시험시의 기준치로 적용 방안 연구						-----	-----	-----	-----				100
■ 공용성과 S_D의 상관성 분석 -노면상태 분석코어 채취 및 코어의 S_D의 분석 -시험포장 현장공용성과 S_D의 상관성 분석						-----	-----						100
■ S_D 측정 표준시험법 제시										-----	-----		100
■ 표준 시험장치 사양의 제시											-----	-----	100
총진도율													100

----- 당초계획
 _____ 실적

나. 연구개발 목표의 달성

연구 목 표	달성도 (%)	내 용
■ 잔유변형강도 비 산정 -최적의 수침시간 선정 -박리저항성 측정 가능성 유무	100%	-변형강도 시험으로 박리저항성 측정 가능성 유무를 확인하기 위하여 OAC로 제조된 공시체를 60℃ 항온수조에 24시간과 48시간 수침시켜 S_D 를 측정
■ SMA 혼합물의 공용성과 S_D의 상관성 연구 -SMA 혼합물의 실내실험 -SMA 혼합물의 현장 공용성 분석	100%	-4가지 종류의 바인더로 배수성 혼합물을 제조하고 S_D 를 측정하여 Wheel tracking 시험과의 상관성을 분석으로 변형강도 시험의 적용 가능성을 판단.
■ 배수성 혼합물의 공용성과 S_D의 상관성 연구 -배수성 혼합물의 실내 실험 -배수성 혼합물의 현장공용성 분석	100%	-4가지 종류의 바인더로 SMA 혼합물을 제조하고 S_D 를 측정하여 Wheel tracking 시험과의 상관성을 분석으로 변형강도 시험의 적용 가능성을 판단.
■ 시험포장 위치 선정 및 포설 -사전 준비된 재료를 포설하고 노면상태와 S_D의 연관성 평가	100%	시험포장 위치를 협의하여 선정 -시험포장에 사용될 재료를 사전의 실내실험에서 비교적 차이가 분명한 4종류로 선정
■ 시험포장의 추적 조사 -시험포설 포장의 품질 확인	100%	-포장품질확인을 위한 각종 실험: 비파괴 밀도, 코어 공극 및 밀도, 아스팔트함량, 두께 등 측정
■ 모형주행 시험장치에 의한 모형주행시험 및 상관성 분석 -4section에 시험포장 포설 -주행을 통한 재료의 공용성과 S_D의 상관성 분석	100%	1, 2차년도에 이어 3차년도 시험피트 8 section에 시험포장을 포설하여 모형주행시험기에 의한 하중재하를 통한 재료의 공용성과 S_D 의 상관성을 분석
■ 도로 등급별 S_D 기준치 설정 방안 제시 -일반 밀입도 혼합물 -SMA 혼합물 -배수성 혼합물	100%	일반 밀입도혼합물에 대한 기준치 설정 방안제시. SMA와 배수성 혼합물은 변형강도를 고려한 배합설계방법은 고려될 수 없는 것으로 분석됨
■ 품질관리 시험시의 기준치로 적용 가능성 연구	100%	일반 밀입도 혼합물에 대하여 적용가능성은 확인하였으니 적용기준치는 추가연구 필요
■ 공용성과 S_D의 상관성 분석 -노면상태 분석,코어 채취 및 코어의 S_D의 분석 -시험포장 현장공용성과 S_D의 상관성 분석	100%	시험포장 지역 및 일반지역의 포장 노면상태 분석과 코어채취, 코어에 대한 S_D 의 측정을 통해 공용성과 S_D 의 상관성을 분석
■ S_D 측정 표준시험법 제시	100%	S_D 측정 표준시험법 제시 및 홍보
■ 표준 시험장치 사양의 제시	100%	표준 시험장치 사양을 제시 및 홍보

3. 관련분야 기술발전 기여도

본 연구가 총 3차년도에 걸친 연구로 최종 종료될 시 기대되는 효과는 다음과 같다.

가. 기술적 측면

본 연구가 성공적으로 완수되면 변형강도(S_D)가 아스팔트 혼합물의 기본적인 강도특성으로 이용될 것으로 추정된다. 왜냐하면 그간 마치 기본특성인 것처럼 취급되어오던 마찰안정도가 공용성과의 상관관계가 낮아 무용론이 확산되고 본 특성은 시험 면에서는 편리하면서도 현장에서 가장 문제시되고 있는 소성변형과의 상관성이 높게 나타나기 때문이다. 이를 혼합물의 강도측정에 이용하고 배합설계에 적용하게 되면 국내 아스팔트 산업의 품질향상과 공용수명 연장 효과가 일어나게 될 것이다. 현재까지는 아스팔트 혼합물의 배합설계를 등한시하던 플랜트에서도 자신들이 제시하는 S_D 수치가 소성변형 관련 공용성과 직접관계가 있으므로 무시할 수 없는 상황이 되기 때문이다. 따라서 배합설계를 충실히 함은 물론 변형강도 측정을 통한 강도 증진에 최대한 노력을 기울일 것으로 사료되어 아스팔트 포장분야 기술 발전에 기여하고 포장의 수명증진에 기여하게 될 것이다.

나. 경제·산업적 측면

본 변형강도 (S_D) 시험법이 국내의 표준 시험법으로 정착된다면 고가 외국 장비들의 도입을 줄일 수 있고 그에 따른 경제적 이득도 클 것이다. 즉, 비교적 손쉬운 것으로 인정되는 외국의 Wheel tracking 시험법을 도입한다 해도 그 장비의 구비에 상당한 예산이 소요되고 번거로워 연구용이 아니라면 활성화가 어려운 실정이다. 하지만 이 시험법은 손쉽고 간편하여 국내에서 성공적으로 보급되어 효과가 입증 될 경우 외국으로의 장비 보급에 따른 경제 효과도 상당할 것으로 판단된다. 더구나 S_D 는 시험 측정치에 신뢰성이 크므로 이를 통해 소성변형을 제어하기 위한 노력이 배가되므로 아

스왈트 포장의 조기 손상방지에 따른 국가 예산의 낭비를 크게 줄여줄 수 있을 것이다.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

1. 연구성과

본 연구의 최종 목표는 아스팔트 혼합물의 변형강도 측정법을 개발하고 이 시험법의 타당성을 현장 공용성과의 상관성 평가를 통하여 표준화된 소성변형 추정방법을 제시하는 것이다. 3차 년도까지의 연구성과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 변형강도는 밀입도 아스팔트 혼합물의 공극률 변화와 밀접한 관계가 있어 공극률이 높으면 변형강도가 낮고 공극률이 낮아지며 강도가 높아진다. 약 4% 공극률에서 최대의 변형강도를 이루었다가 그 이하로 낮아지면 변형강도도 다시 낮아진다. 따라서 기존의 배합설계 기준인 공극률 4%와 병행하여 배합설계에 하나의 변수로 적용이 가능함을 알 수 있었다.
- 2) 대형분자와의 상관성 분석에서, 노화 시간의 증가함에 따라 대형분자(LMS)의 증가가 뚜렷하게 나타났으며, S_D 는 그 LMS 변화와 양호한 상관관계를 가짐을 알 수 있었다. 이는 혼합물의 상태변화가 변형강도 측정을 통해서도 확인될 수 있음을 발견한 것이며, 변형강도와 혼합물의 소성변형 특성과 상관성이 밀접함을 재차 확인한 것이라 할 수 있다.
- 3) 현장모의 원형주행 장치(FCWT)에 의한 침하깊이는 각 혼합물의 소성변형저항 특성을 잘 대변하는 것으로 나타났다. 즉, 각 재료별 포설 당시 혼합물로 제조한 공시체의 변형강도는 FCWT에 의한 최종침하깊이 및 동적안정도와 매우 높은 상관관계를 보였다. 반면에 코어 채취한 공시체에서 측정한 S_D 는 실험실 제조 공시체로 측정한 S_D 보다

전체적으로 크게 낮으나 FWCT 결과와의 결정계수(R^2)가 0.72 이상이 었다.

4) 변형강도와 현장 공용성과의 상관성 분석을 위하여 현장 침하깊이와 같은 위치에서 채취한 코어 공시체의 S_D 를 회귀분석을 수행한 결과 상관관계가 양호한 것으로 나타났다. 양 궤적(wheel path)의 소성변형 깊이와 같은 차로 같은 선상의 중앙부(Mid lane)에서 채취한 표층 코 어의 S_D 를 보면 소성변형이 심한 곳의 S_D 가 소성변형이 적은 곳의 S_D 보다 낮은 경향을 확인할 수 있었으며 3년간 전체 data의 R^2 이 0.71 이상이어서 양호한 상관관계가 있음을 알 수 있었다.

5) 현장 소성변형 특성분석을 위해 시험포장을 수행하였으며 소성변형이 발생하는 다음 연도부터 소성변형 측정과 코어채취를 통해 변형강도 와의 상관성 분석을 수행하였다. 코어의 변형강도와 현장에서 측정된 소성변형 깊이와의 상관성을 분석한 결과 2년간의 R^2 이 역시 0.7 정도 로 양호하게 나타났다.

6) 변형강도와 APA 시험의 침하깊이와의 상관성은 $R^2 > 0.78$ 로 좋게 나 타났다. APA 시험기는 미국 Georgia, South Carolina 주 등 여러 주 에서 아스팔트 혼합물의 소성변형을 판정하는 시험기로, 일정치 이상 침하깊이를 보이면 불합격처리 한다. 따라서 이 APA 시험결과와 S_D 의 상관관계가 좋다는 것은 그만큼 S_D 가 소성변형 저항성의 측정치로 서 신뢰성이 있음을 의미한다고 하겠다.

7) 노화의 시간에 따른 대형분자 (LMS)의 변화 연구에서 단기노화는 165°C 에서 1시간이 적절한 것으로 확인되었다. 장기노화상태의 진전은 초기 24시간 사이에 크게 증가되었고 그 이후로는 증가 추세가 완만

하게 나타나 인공노화 초기에 주로 급속한 노화가 나타남을 알 수 있었다. 본 연구를 통해 아스팔트 혼합물을 실험실에서 단기와 장기 인공노화 시키는 방법을 정립하는 계기가 되었다. 향후 이를 보완 연구하면 국내 실험연구의 표준 방법으로 사용이 가능할 것으로 보인다.

- 8) 반복성 시험결과, 변형강도의 1, 2단계 시험간의 상관성은 여타 시험 방법들보다 월등히 높게 나타났다. 두 결과의 상관관계는 높게는 $R^2 = 0.95$ 이상부터 적어도 $R^2 = 0.78$ 이상이어서 두 제조방법 모두에서 비교적 좋은 상관성을 보였다. Wheel tracking의 R^2 도 S_D 와 유사하였지만 안정도나 간접인장강도는 R^2 이 매우 낮았다.
- 9) 건조오븐에 공시체를 넣고 60°C 로 가열하는 방법은 공시체 내부가 시험온도인 60°C 가 되는데 2시간이 걸려 30분 만에 가열되는 수침가열에 비해 4배 오래 걸렸다. 오븐 가열된 공시에의 S_D 는 수침가열에 비해 더 높게 나타나며 변동계수도 더 커서 시간이 적게 걸리고 변동성이 낮은 수침가열이 더 좋은 방법으로 확인되었다.
- 10) 공시체 직경 100mm의 S_D 평균은 150mm 공시체의 평균보다 적게 나타나 공시체 직경에 따른 차이가 통계적으로 유의차가 있는 것을 알 수 있었다. 이제까지의 data에 의하면 약 10% 정도의 차이가 나므로 이를 반영하여 배합강도 기준치에 적용토록 하였다.
- 11) 직경 40mm 하중봉의 적정 원형절삭 반경(r) 선정을 위해 다양한 r 에 대해 변동성 및 민감도 분석을 수행한 결과 굵은골재 최대치수 10, 13, 19mm 아스팔트 혼합물에서 $r=10\text{mm}$ 가 가장변동성이 적은 것으로 나타났다. 침하깊이(y) 변화에 따른 민감도 분석에서 r 이 너무 크면 낮은 y 에서 변동성이 매우커지며 반면에 r 이 너무 작으면 변동성은

줄어드나 민감도가 떨어져 변별력이 낮아지는 것으로 나타났다. 하지만 $r=10\text{mm}$ 은 상기 크기 골재 혼합물에서 실용적 침하깊이 $y=3\sim6\text{mm}$ 수준에서 가장 안정적이고 변동성이 낮으며 비교적 변별력도 큰 시험결과를 얻는 것으로 나타났다. 따라서 하중봉 치수는 $D=40\text{mm}$, $r=10\text{mm}$ 로 결정하였다.

12) 재하속도 연구에서 변형강도 값은 재하속도가 증가함에 따라 같이 증가하는 경향을 보였다. 따라서 재하속도가 느릴수록 응력이완 현상 및 더 큰 수평 전단유발에 의해 변형강도가 낮게 측정되는 것으로 추정된다. 재하속도별로 얻어진 S_D 값과 WT 시험결과와의 상관성 분석을 통해 30mm/min 의 속도가 가장 적합한 것으로 선정되었다.

13) 변형강도가 혼합물은 같은 온도인 60°C 동적크리프가 작아 변형의 진행이 느린 것으로 나타났다. 이로부터 변형강도가 높으면 동하중 하에서 혼합물의 변형이 늦게 진전되므로 소성변형에 강할 것임을 변형강도와의 상관성분석을 통해서 알 수 있었다.

14) 회복탄성계수(M_R)의 측정이 가능한 비교적 고온인 40°C 에서의 M_R 은 S_D 와 비교적 높은 상관관계를 보였다. 이를 통해 S_D 시험치는 Dynamic 재하 시험인 인 동적크리프나 M_R 시험 치와도 양호한 상관관계를 보이는 것을 확인할 수 있었다.

15) 60°C 수침처리 후 변형강도 유지비를 보면 48시간 수침처리가 적절한 것으로 판단되며, 변형강도 시험은 수침으로 취약해진 혼합물의 특성을 비교적 잘 나타내는 시험법임을 알 수 있었다. 하지만 48시간 수침처리 후 취약해진 혼합물의 특성을 WT으로는 입증하기 어려워 향후 별도의 검증 전에는 변형강도에 의한 수분취약성 시험의 실

제 적용은 보류해야할 것으로 판단된다.

- 16) 종합적으로 밀입도 아스팔트 혼합물의 변형강도는 고온(60°C)에서 수행되는 wheel tracking, APA시험, 동적크리프시험은 물론 40°C에서 수행된 M_R 과도 모두 R^2 이 0.7 이상으로 양호한 상관관계를 보이는 것을 알 수 있었다. 게다가 현장 소성변형 특성과도 상관관계가 좋아 변동성이 큰 건설재료의 특성을 고려한다면 변형강도는 매우 우수한 아스팔트 혼합물의 소성변형 저항성 측정치라 할 수 있다.
- 17) SMA 혼합물의 변형강도 시험 결과 유사한 WT 결과를 보이는 밀입도 혼합물에 비하여 전반적으로 낮은 S_D 를 보였다. 또한 SMA가 실제 도로에서 우수한 점과 비교시 WT 시험 결과도 밀입도 보다 그리 좋지 못해 S_D 는 물론 WT을 통해서도 SMA의 소성변형 저항성이 제대로 평가되지 못하는 것으로 확인되었다. 또한, 시험결과 치가 낮기도 하지만 두 값의 상관성도 낮아 SMA 혼합물에는 일반 밀입도 혼합물에 쓰이는 시험법들의 적용에 한계가 있음을 확인하였다.
- 18) 배수성 혼합물의 변형강도 적용에서는 국내 배수성과 미국의 OGFC (Open-graded friction course) 모두 SMA 혼합물과 같이 변형강도 값이 밀입도에 비하여 전반적으로 낮게 나왔다. 또한 WT 시험과의 상관성 분석결과도 전반적으로 낮아 SMA과 마찬가지로 배수성 혼합물 등 특수 혼합물에는 일반 밀입도 혼합물에 쓰이는 시험법들의 적용에 한계가 있음을 확인하였다.
- 19) 따라서 향후 SMA 등 특수 아스팔트 콘크리트의 변형강도 적용을 위해서는 보다 다양한 형태의 하중 재하기구, 다른 재하 속도 및 공시체 치수를 사용한 추가 연구가 필요하다. 즉, 본 연구의 목적은 본

래 밀입도 아스팔트 포장에 만연하는 소성변형을 보다 효과적으로 제어하기 위하여 변형강도 시험법을 개발하는 것이었으므로 SMA 등 특수혼합물을 위해서는 향후 가칭 “특수혼합물의 특성평가 기법 개발”과 같은 별도의 연구가 필요한 것을 확인하였다.

20) 현장원형모의주행시험기의 최종침하깊이와 포설 당시 변형강도와의 상관성은 밀입도 혼합물에서 R^2 값이 0.7 이상으로 양호한 상관성을 보였다. 하지만 배수성 혼합물의 경우 현저하게 낮은 변형강도와 상관성을 보이며 배수성 배합설계에 변형강도를 적용하는 데는 더 많은 연구가 필요함을 확인하였다.

21) 아스팔트 혼합물(직경 100mm 공시체)의 평균 변동계수(V_c)는 8.4(%)이었다. 따라서 $V_c = 8.4\%$ 로 하면 표준편차 $s = 0.084 \times \text{평균}$ 이고, 검사특성곡선 개념을 이용하여 소비자 위험률 10%(0.1)를 임계치를 번어날 확률로 정하고 정규분포 표에서 $z_{0.1} = -1.28$ 과 공시체수 $n=3$ 을 이용하여 밀입도 아스팔트 혼합물의 배합강도 최소치를 산정하면 일반도로포장용 혼합물 3.2MPa와 간선도로포장용 혼합물 4.25MPa가 설정되었다.

22) 상기의 배합강도는 재하속도 30mm/min를 기준으로 한 값이다. 만일 국내에 많이 보급된 마샬 안정도 시험기의 50mm/min 속도로 변형강도를 측정하면 이보다 더 높은 값이 얻어진다. Data에 의하면 그 증가는 일반도로포장용 혼합물은 10%, 간선도로포장용 혼합물은 6%이며 이를 공시체 직경 100mm 혼합물에 적용하면 일반도로와 간선도로는 각각 3.5MPa, 4.5MPa의 배합강도가 기준치가 된다.

23) 모든 혼합물은 항상 같은 품질로 생산이 되지 않고 편차가 발생하며

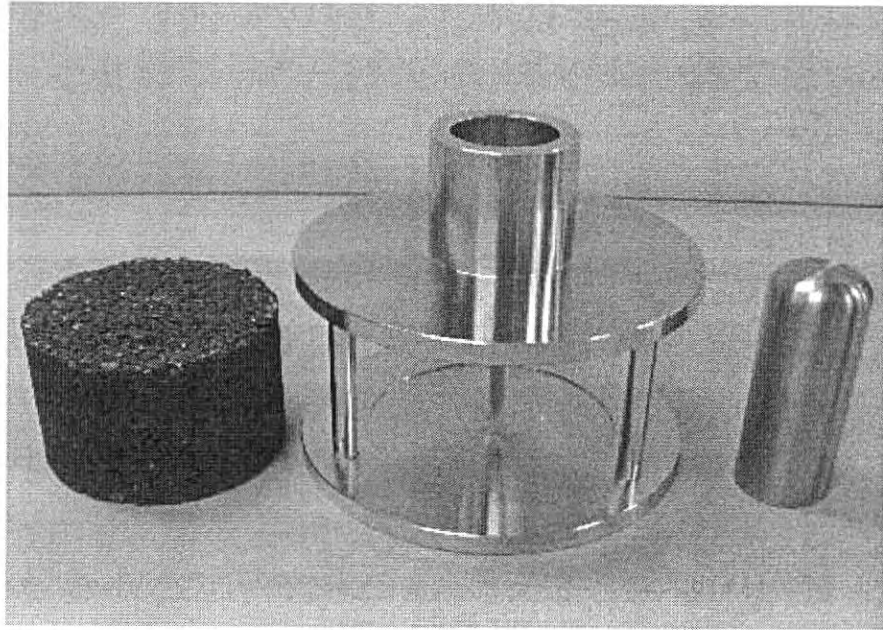
이 편차의 정도가 변동계수(V_c)로 나타나며 제조되는 혼합물의 배합 강도(공정 평균: m)도 V_c 에 따라 차이가 나게 된다. 따라서 상기의 배합강도 최소치는 공시체 3개와 변동계수가 8.4% 정도 얻어지는 밀 입도 혼합물에 근거해 정해진 것이며 변동계수가 더 커지면 배합강도는 더 높아져야 한다.

24) 본 연구를 통해 변형강도를 품질관리를 코어공시체에 대해서도 측정할 수 있음을 확인 하였다. 하지만 포설후 채취한 공시체는 공극률이 높고 코어 채취시 수압의 영향 때문에 배합강도보다 낮은 값이 얻어진다. 따라서 배합강도를 그대로 코어에 적용하는 것은 문제가 있어 S_D 합격치의 설정을 위해서는 이 두 가지 요인에 따른 강도저하 값을 다양한 data를 이용하여 통계적으로 정량화하여 결정하는 상당한 연구가 뒤따라야 할 것이다.

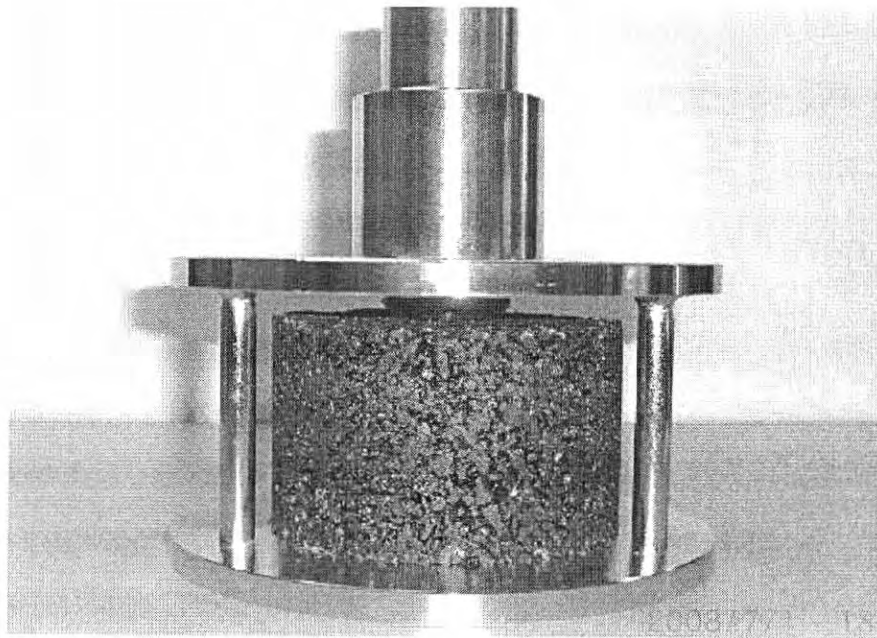
25) 본 연구에서 정립된 변형강도 시험법을 요약하면 아래와 같고 그림으로 나타내면 Figure S-3와 같으며 개발된 변형강도 시험용 Assembly는 그림 5.1 a, b와 같다.

- ① 하중봉의 직경 $D=40\text{mm}$ 이고 원형절삭반경 $r=10\text{mm}$.
- ② 공시체 온도를 60°C 로 만들기 위한 수침 시간은 30분, 정 하중재하 속도 30mm/min .
- ③ 공시체 준비를 위해서 다짐은 선회다짐기를 사용하며, 일반도로 포장용 아스팔트 혼합물은 75회 간선도로 포장용 혼합물은 100회.
- ④ 공시체의 두께(높이)는 $63 \pm 2\text{mm}$ 이며 공시체 직경은 100mm 혹은 150mm 사용.
- ⑤ 배합설계시 최소 변형강도(S_D)는 100mm 공시체 사용시 일반도로 포장용의 경우 3.2MPa , 간선도로포장용 혼합물은 4.25MPa 임.
- ⑥ 배합설계에 적용되는 변형강도기준 및 그 이용 방법은 국토해양부

잠정지침의 배합설계법에서 제시한 그림 5.2의 흐름도를 통해 알 수 있음.

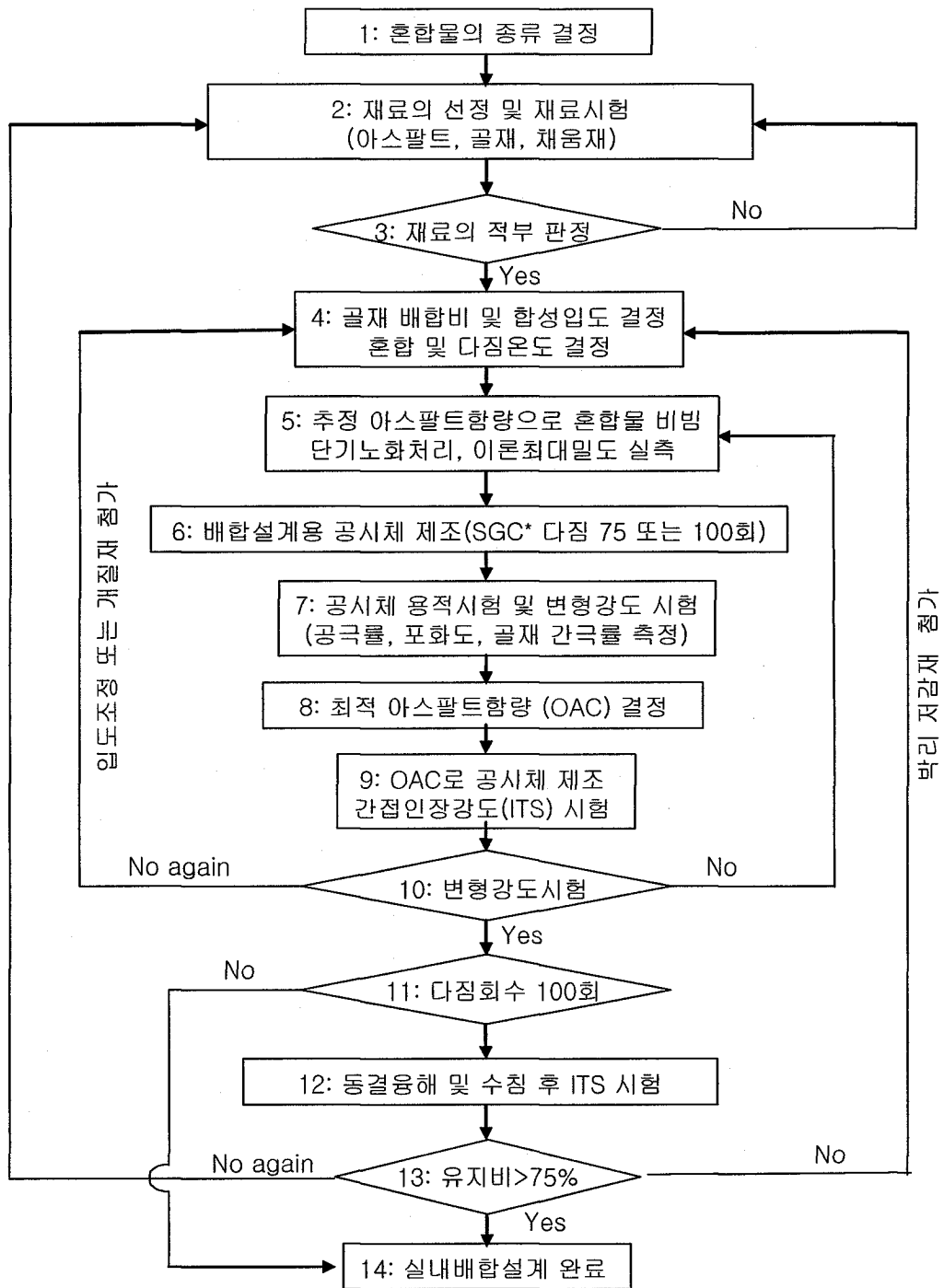


(a)



(b)

그림 5.1. (a) 하중봉, 재하 몰드와 100mm 공시체, (b) 공시체를 몰드에 넣고 하중봉을 넣은 상태의 모습.



- 단기노화: 비빈혼합물을 160°C오븐에서 1시간 보관
- SGC (superpave gyratory compactor: 선회다짐기)
- 유지비(%) =(동결 및 수침 후 ITS/ ITS) x100

그림 5.2. 개선된 배합설계 흐름도 (국토해양부 2008)

2. 연구성과 발표 논문

2008년

1. 백성현, 조병진, 김현환, 박남원, 김광우, “아스팔트 콘크리트 변형강도 시험의 적정재하속도 선정연구,” 한국도로학회 학술발표회, 2008. 3.
2. 김현환, 김진철, 라일호, 도영수, 김광우, “CRM 혼합물의 박리저항성 향상 연구,” 한국도로학회 학술발표회, 2008. 3.
3. 박남원, 백성현, 이순제, 도영수, 김광우, “OGFC 혼합물의 변형강도 특성연구,” 한국도로학회 학술발표회, 2008. 3.
4. Hyun. H., Kim, Nam. W., Park, Young. S., Doh, Soon. J., Lee, Serji N. Amrikhanian, Kwang. W., Kim, “Rutting Estimation of Asphalt Pavement Mixtures using Deformation Strength” Paper presented at 2008 European Asphalt Technology Association Meeting, Lyon, France, April. 2008.
5. 박태원, 도영수, 김광우, “변형강도 시험용 하중봉의 원형질삭반경 선정 연구” 한국도로학회 논문집, 10(2), 2008, 6, 183-192
6. 이학일, 김현환, 박남원, 김광우, “특정 개질아스팔트 혼합물의 노화, 균열 및 변형특성” 한국도로학회 논문집, 10(2), 2008, 6, 205-219
7. 김현환, 백성현, 김진철, 라일호, 박남원, 도영수, 김광우, “아스팔트 혼합물의 소성변형 특성 평가치로 변형강도의 도입” 한국도로학회 학술발표회, 2008. 10.
8. 라일호, 김현환, 조병진, 도영수, 김광우, “아스팔트 혼합물의 수침/건조 가열에 따른 변형강도 비교” 한국도로학회 학술발표회, 2008. 10.
9. 백성현, 유민용, 김진철, 박태원, 도영수, 김광우, “역청콘크리트 공시체

- 직경에 따른 변형강도(S_D)의 차이” 한국도로학회 학술발표회, 2008. 10.
10. 조병진, 박태원, 도영수, 김광우, “아스팔트 콘크리트 변형강도 시험에서 적정 재하속도 선정연구,” 한국도로학회 논문집 **10(4)**, 2008, **12. 225-234**

2007년

1. Young S. Doh, Kyong K. Yun, Serji N. Amirkhanian, and Kwang W. Kim, “Framework for developing a static strength test for measuring deformation resistance of asphalt concrete mixtures,” The Journal of Construction and Building Materials. (SCI), 2007. 12.
2. 정재현, 박태원, 도영수, 김광우, “LMS(%)와 SD에 의한 노화 아스팔트 혼합물의 소성변형 추정,” 한국도로학회, 2007. 9.
3. Jae H., Jung, Jong S., Lee, Jun S., Kweon and Kwang W., Kim, “Change of Deformation Strength due to Mixture Aging,” Proceedings of 5th MAIREPAV Conference, 2007. 8
4. Nam. W., Park, Hyun H., Kim, S. H., Beak, K. W., Kim and Y. S., Doh, “Correlation of Deformation Strength (SD) with Lab Data and Field Rutting Data of Asphalt Pavements,” UKC Conference, 2007. 8
5. Nam. Won., Park, Jae Hyun., Jung, Byung Jin., and Kwang Woo, Kim, “Fundamental Characteristics of Monomer-Modified Warm-Mix Asphalt Concretes,” Proceedings of 12th ICPIC, 2007. 9.
6. Hyun Hwan., Kim, Tae Won. Park, Sung Hyun., Beak, and Kwang Woo. Kim, “Prediction of Permanent Deformation of Polymer-modified asphalt Concretes using Deformation Strength,” Proceedings of 12th ICPIC, 2007. 9.
7. 정재현, 이종섭, 박남원, 김광우, “아스팔트 대형분자 변화에 따른 혼합물의 소성 변형 특성의 변화,” 한국도로학회 학술발표회, 2007. 3.

8. 백성현, 김현환, 권준석, 도영수, 김광우, “아스팔트 포장의
현장 공용성과 변형강도의 상관성 분석,” 한국도로학회 학술발표회,
2007. 3.
9. 점재현, 조병진, 박남원, 김광우, “아스팔트 혼합물의 노화에 따른
반복주행시험 특성 변화평가,” 한국도로학회 학술발표회, 2007. 10.
10. 백성현, 이종섭, 권준석, 김광우, “김테스터를 이용한 동적크리프
시험에 근거한 아스팔트 혼합물의 소성변형 저항성 평가,”
한국도로학회 학술발표회, 2007. 10.

2006년

1. Young S. Doh, Kyong K. Yun, Serji N. Amirkhanian, and Kwang W. Kim, “Framework for developing a static strength test for measuring deformation resistance of asphalt concrete mixtures,” The Journal of Construction and Building Materials. (SCI), Internet Ed., 2006. 10.
2. 김광우, 이종섭, 정재현, 박태원, “아스팔트 콘크리트의 최대 변형강도와 적정 공극률,” 대한토목학회 정기학술발표회. 2006. 10.
3. 김부일, 이문섭, 김광우, “포장성능관련 역학적 특성이 고려된 아스팔트 혼합물의 배합설계 방안,” 한국도로학회 논문집, 8(1), Mar.2006, 15-23
4. 고태영, 이종섭, 도영수, 김광우, “개선된 혼합물방법을 이용한 재활용 아스팔트 혼합물의 피로 및 변형특성 분석”, 한국도로학회 봄 학술발표대회, 2006.3. 105-112
5. 정재현, 박태원, 이종섭, 김광우, “아스팔트 혼합물의 노화에 따른

변형강도의 변화, ”한국도로학회 정기학술발표회, 2006.10.

3. 활용계획

가. 본 연구를 통해 그간 실내실험으로만 개발하면서 실용가능성이 클 것으로 확인된 변형강도(S_D)를 현장 공용성의 확인을 통한 실용화로 추진한다면 본 시험법의 개발은 성공 가능성이 매우 높고 국내는 물론 외국에서도 활용성이 매우 클 것이다. 왜냐하면 혼합물의 변형강도가 높으면 실제 도로에서도 침하깊이가 낮게 나타날 가능성이 매우 높음이 확인 되었고, 배합설계를 통해 변형강도를 일정수준 이상으로 제어하면 소성변형에 강한 혼합물을 사용하게 되기 때문이다.

나. 국내의 경우 S_D 를 배합설계에 주요 변수로 채택하도록 추진할 것이다. 왜냐하면 현 배합설계에는 물리적 성질에 해당하는 공극과 채움율(포화도)외에 학적 특성 중 하중관련 변수로 안정도와 변형관련 변수로 흐름이 있다. 하지만 이 두 가지 다 무용론이 제기되고 있어 이의 대체특성이 필요하며 배합설계의 개선도 필요하다.

다. S_D 는 하중관련변수 “P”와 변형관련 변수 “y”의 함수이므로 안정도와 흐름을 제외하고 이것이 포함된다면 이는 제외되는 두 특성을 모두 반영하는 것이 된다. 그리고 S_D 값의 기준을 현장공용성에 근거해서 설정하게 된다면 현실적인 수치를 배합설계 혼합물에 적용하는 계기가 될 것이다.

라. 그렇게 되면 S_D 의 사용이 아스팔트 혼합물 제조에 필수사항이 되며 그로 인해 아스팔트 혼합물의 품질을 향상시키는 계기가 될 것이다.

마. 이제까지의 연구결과 S_D 는 공극률과 밀접한 관계가 있다. 현장 코어의

경우 배합설계 기준 공극률 4%에 비해 초기 다짐도가 95% 이상이라도 7-8% 정도이어서 S_D 가 매우 낮다. 이 낮은 값을 그대로 기준에 적용 시 너무 낮아 모두 불합격이 될 것이다. 따라서 향후 공극에 따른 보정계수를 개발하여 이를 적용하면 현장혼합물에 대한 품질관리 기준으로 적용이 가능할 것이다.

바. 이 기술로 국제 특허를 추진한다면 국내는 물론 외국으로의 시험기술의 전수는 물론 표준 시험장치를 수출하는 계기가 마련될 것이다.

사. 국내의 경우는 이 장비의 Prototype을 개발하고 이를 통해서 표준 제원만을 제시함으로서 여러 생산업체의 경쟁을 유발하여 보다 경제적인 제품생산이 가능하도록 할 것이다.

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

1. Epps, A. and Hand, A. (2001), "A Comparison of HMA Field Performance and Laboratory Volumetric Sensitivities," Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Volume 70.
2. Aschenbrener, T., (1995), "Evaluation of the Hamburg Wheel-Tracking Device to Predict Moisture Damage in Hot-Mix Asphalt." Transportation Research Record 1492, Transportation Research Board, Washington, DC, pp. 193~201.
3. British Standards Institution, (1998), "Methods of test for the determination of wheel-tracking rate and depth", Sampling and examination of bituminous mixtures for roads and other paved areas, BSI, London, BS598: Part 110.
4. C L Monismith and A A Tayabali, (1988), "Permanent Deformation (Rutting) Considerations in Asphalt Concrete Pavement Actions," Asphalt Paving Tech., V.57, pp 414~446.
5. E. Ray Brown, (1997), "Performance of Stone Mastic Asphalt (SMA) Mixtures in the United States," Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Volume 66.
6. E.R. Broun, Dale Decker., (1999), "Superpave Construction Issues and Early Performance Evaluation" Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Volume 68.
7. G.M. Rowe, (1997), "Validation of the Fatigue Performance of Asphalt Mixtures with Small Scale Wheel Tracking Experiments," Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Volume 66.
8. Harvey, J. and L. Popescu, (2000), "Rutting of Caltrans Asphalt

concrete and Asphalt-Rubber Hot Mix Under Different Wheels, Tires and Temperatures – Accelerated Pavement Testing Evaluation," Draft Report for California Department of Transportation, Pavement Research Center, University of California, Berkeley, January.

9. John Epps, (1998), "Westrack Performance-Interim Findings," Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Volume 67.
10. John Haddock, (1998), "Performance of a Warranted Hot Mix Asphalt Pavement in Indiana," Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Volume 67.
11. John Harvey, Manuel Bejarano and Lorina Popescu, "Accelerated Pavement Testing of Rutting and Cracking Performance of Asphalt-Rubber and Conventional Asphalt Concrete Overlay Strategies," Proceedings of the Asphalt Rubber 2000 Conference, Part 2.
12. John T.G. Richardson., (2000), "Laboratory Performance-Based Testing of Asphalt Mixtures in the United Kingdom", Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Volume 69.
13. John W.H. Oliver, (1998), "Relationships between Asphalt Rut Resistance and Binder Rheological Properties," Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Volume 67.
14. Louay Mohammad., (1999), "Laboratory Performance Evaluation SMA, CMHB and Dense Graded Asphalt Mixtures" Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Volume 68.
15. Manfred N. Partl, (1995), "Performance-Related Testing of Stone Mastic Asphalt," Journal of the Association of Asphalt Paving

Technologists, Volume 64.

16. Mark G. Bouldin, (1994), "Mix Rheology-A Tool for Predicting the High Temperature Performance of Hot Mix Asphalt," Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Volume 63.
17. N. Shashidhar, S.P. Needham., (1999), "Prediction of the Performance of Mineral Fillers in Stone Matrix Asphalt" Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Volume 68.
18. Rabbira Garba and Ivar Horvli, (2002), "Prediction of Rutting Resistance of Asphalt Mixtures," Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields, Volume 2, pp 839~849.
19. S F Brown and B V Brodrick, (1981), "Nottingham Pavement Test Facility," Transportation Research Record 810, pp 67~72.
20. Sam Maccarrone, Glynn Holleran and Gerard P. Gnanaseelan, (1995), "Properties of Polymer Modified Binders and Relationship to Mix and Pavement Performance," Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Volume 64.
21. Shatnawi, S., (1999), "Performance of Asphalt Rubber Mixes in California" Submitted, International Journal of Road Materials and Pavement Design, Hermes Science Publications, Paris, France, July.
22. Standard Specifications, California Department of Transportation, Sacramento, July, 1995.
23. Stephen F. Brown and J. Michael Gibb, (1996), "Validation Experiments for Permanent Deformation Testing of Bituminous Mixtures," Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Volume 65.
24. Tracking Test, Determination of the Track Depth of High-Stability Binding Layers. Construction Bureau, Civil Engineering Office,

Department of Civil Traffic, Hamburg, Germany.

25. Uzan, J., (1996), "Asphalt concrete characterization for pavement performance prediction," Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Volume 65.
26. W.S. Mogawer, K.D. Stuart, (1995), "Effect of Coarse Aggregate Content on Stone Matrix Asphalt Rutting and Draindown" TRR 1492, Transportation Research Board, Washington, D.C., pp. 12~17.

제 7장 참고 문헌

- Brown S., Gibb J. (1996), "Validation of experiments for permanent deformation testing of bituminous mixtures," *Journal of the Asphalt Paving Technologists*, Vol. 65, 255-299.
- Doh, Y. S., Yun, K. K., Amirkhanian, S. N. and Kim, K. W. (2007), "Framework for developing static strength test for measuring deformation resistance of asphalt concrete mixtures," *Construction and Building Materials*, 21(12).
- Hafez, I. (1997), "Development of a simplified asphalt mix stability procedure for use in Superpave volumetric mix design," Ph.D. Dissertation, University of Maryland, College Park, MD
- "Hot-Mix Asphalt Material Properties," (2007), SCDOT Designation: SC-M-402 (06/07).
- Jung, J. H., Lee, J. S., Kweon, J. S. and Kim, K. W. (2007), "Change of Deformation Strength due to Mixture Aging," *Proceedings of 5th MAIREPAV Conference*, Park City, Utha, USA, 133-138.
- Kaloush, K. E. (2001), "Simple performance test for permanent deformation of asphalt mixtures," Ph.D. Dissertation, Arizona State University, Tuscan, AZ
- Kim, H. H., Park, N. W., Doh, Y. S., K. Ahn, Lee, S. J. and Amrikhanian, S. N., Kim, K. W. (2008), "Rutting Estimation of Asphalt Pavement Mixtures using Deformation Strength," Paper presented at 2008 European Asphalt Technology Association Meeting, Lyon, France.
- Kim, H. H., Park, T. W., Baek, S. H. and Kim, K. W. (2007), "Prediction of Permanent Deformation of Polymer-Modified Asphalt Concretes using Deformation Strength," *ICPIC Proceedings*, Ed. by Yeon, 657-664.
- Kim, K. W. Choi, S. J. Lee, G. H. and Lee, M. S. (2003), "Correlation of

Deformation Strength with Permanent Deformation of Polymer-Modified Asphalt Concretes," The 4th ASPIC, Chuncheon, Korea.

Kim, K. W., Doh, Y. S., Lee, K. H., Cho, M. J. Kwon, O. S. and Ko, T. Y. (2004), "Use of deformation strength for predicting rut resistance of asphalt concrete," Proceedings, Advanced Technologies in Asphalt Pavement, 57-82.

Kim, K. W., Lee, G. H., Kwon, O. S. and Cho, M. J. (2005), "Validation of Kim Test Using Asphalt Pavement Analyzer and Dynamic Creep Test," Proceedings of 5th ICPT, Ed. by Kim, May 2005, 534-540.

Kim, K. W., Lee, G. H., Lee, M. S. Choi, S. J. (2005b), "Development of Deformation Strength as a Relative Index for Estimating Rut Resistance of Asphalt Concretes," Proceedings of 5th ICPT, Ed. by Kim, May 2005, 864-871.

Kim, K. W., Doh, Y. S. and Amirkhanian, S. N. (2004b), "Feasibility of deformation strength for estimation of rut resistance of asphalt concrete," Road Materials and Pavement Design, 5(3), 303-322.

Krutz, N., Siddharthan, R., Stroup-Gardiner, M. (1991), "Investigation of Rutting Potential Using Static Creep Testing on Polymer-modified asphalt concrete mixture," Transportation Research Record 1317, TRB, 100-108

Park, N. W., Kim, H. H., Baek, S. H., Kim, K. W. and Doh, Y. S. (2007), "Correlation of Deformation Strength (SD) with Lab Data and Field Rutting Data of Asphalt Pavements," UKC Conference, Washington, DC, USA, Aug.

Witzack, M., Kaloush, K., Quintus, H. (2002), "Pursuit of the simple performance test for asphalt mixture rutting," Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 71, AAPT.

김광우, 김성태, 권오선, 도영수 (2004), "수퍼페이브 혼합물의 소성변형저항성과 변형강도와의 상관성 분석," 한국도로학회 논문집 6(4), 45-53.

- 김광우, 도영수 (2006), “아스팔트 혼합물 반복주행시험에서 합리적 동적안정도의 산정방법,” 한국도로학회 논문집, 8(1), 77-87.
- 김광우, 도영수, 조문진 (2005), “바인더 Stiffness와 혼합물의 변형강도 및 동적크리프 특성과의 상관성 분석을 통한 김테스트 적용성 고찰,” 한국도로학회 논문집, 7(4), 91-100.
- 김광우, 도영수, 이기호, 조문진, 권승준 (2004b), “Kim Test에 의한 변형강역학적고찰,” 한국도로학회 학술대회 논문집, 47-52.
- 김광우, 도영수, 이기호, 조문진, 최선주 (2004c), “개질아스팔트 혼합물의 변형강도 측정연구,” 석재연논문집 9, 191- 206.
- 김광우, 도영수, 이문섭, 고태영 (2005b), “아스팔트 혼합물의 실제 변형특성이 반영된 동적 안정도의 산정 방안,” 한국도로학회 학술발표회 논문집.
- 김광우, 이기호, 조문진, 고태영 (2005c), “아스팔트 콘크리트의 소성변형 저항성 평가를 위한 동적크리프 시험과 변형강도의 적용성 연구,” 한국도로학회 봄 학술발표 대회 논문집.
- 김광우, 이순제, 정재현, 박태원 (2006), “아스팔트 콘크리트의 최대 변형강도와 적정 공극률,” 대한토목학회 학술발표회 논문집.
- 김광우, 임동섭, 정재현, 이종섭, 도영수 (2006b), “현장 소성변형 모사를 위한 원형 주행 시험기의 개발,” 석재연 논문집, 제 11권.
- 김광우, 조병진, 이순제, 도영수 (2007), “고온내변형 아스팔트혼합물 선정을 위한 변형 강도 임계치의 결정방안,” 한국도로학회 논문집, 9(4), 193-204.
- 김광우, 최선주, 이기호, 도영수, “온도변화에 따른 아스팔트 콘크리트의 변형강도와 소성변형 과의 상관성 연구 (2004b)” 대한토목학회, 24(5D), 743-748.
- 김광우, 최선주, 이문섭, 홍상기, 안경애, 이순제 (2003), “개질아스팔트 콘크리트의 변형강도와 소성 변형특성 연구,” 석재연 논문집 8, 71-88.
- 김부일, 이문섭, 김광우 (2005), “역학적-경험적인 아스팔트 배합설계 방안,” 대한토목학회 학술발표대회 논문집, 대한토목학회.
- 김부일, 이문섭, 김광우 (2006), “포장성능관련 역학적 특성이 고려된 아스팔트 혼합물의 배합설계 방안,” 한국도로학회논문집, 8(1), 15-23.

- 김현환, 김진철, 백성현, 박남원, 라일호, 도영수, 김광우 (2008), “아스팔트 혼합물의 소성 변형 특성치로 변형강도의 도입,” 한국도로학회 학술대회 논문집, 75-82.
- 도영수, 정재현, 임동섭, 김광우 (2005), “반복주행시험에서 침하깊이에 대한 적정 시험온도의 분석,” 한국도로학회 학술발표회 논문집.
- 라일호, 김현환, 조병진, 도영수, 김광우 (2008), “아스팔트 혼합물의 수침/건조가열에 따른 형강도의 비교,” 한국도로학회 학술대회 논문집, 87-92
- 박성범(2002), 공업통계학, 박문사.
- 박태원, 도영수, 김광우 (2008), “변형강도 시험용 하중봉의 원형절삭반경 선정연구,” 한국도로학회 논문집, 10(2), 183-192
- 백성현, 김현환, 권준석, 도영수, 김광우 (2007), “아스팔트 포장의 현장 공용성과 변형 강도의 상관성 분석,” 한국도로학회 봄 학술대회 논문집.
- 백성현, 유민용, 김진철, 박태원, 도영수, 김광우 (2008), “역칭콘크리트 공시체 직경에 따른 변형강도(S_D)의 차이,” 한국도로학회 학술대회 논문집, 137-144
- 백성현, 이종섭, 권준석, 김광우 (2007b), “김테스터를 이용한 동적크리프 시험에 근거한 아스팔트 혼합물의 소성변형 저항성 평가,” 한국도로학회 학술발표회 논문집, 481-488
- 백성현, 조병진, 김현환, 박남원, 김광우 (2008b), “아스팔트콘크리트 변형강도시험의 적정 재하속도 연구,” 한국도로학회 봄학술대회 논문집, 한국도로학회, 73-78
- “아스팔트 혼합물의 생산 및 시공 잠정지침,” (2008), 국토해양부
- “아스팔트 콘크리트의 변형강도 측정용 홀더 및 그를 이용한 변형강도 측정방법 (2008): 특허 제10-0792830호
- 임동섭, 박태원, 도영수, 김광우 (2006), “개질아스팔트 배수성 혼합물의 최적 아스팔트 함량 결정,” 봄학술대회 논문집, 한국도로학회, 113-118.
- 이문섭, 최선주, 도영수, 김광우 (2004), “공시체 크기가 변형강도를 이용한 소성변형 추정에 미치는 영향,” 한국도로학회 논문집 6(2), 1-13.

- 정재현, 박태원, 도영수, 김광우 (2007), “LMS (%)와 S_D 에 의한 노화아스팔트 혼합물의 소성변형 추정,” 한국도로학회 논문집 9(3), 123-134
- 정재현, 박태원, 이순제, 김광우 (2006), “아스팔트 혼합물의 노화에 따른 변형강도의 변화,” 한국도로학회 학술대회 논문집, 115-120
- 정재현, 이종섭, 박남원, 김현환, 백성현, 이순제, 김광우 (2007b), “내변형기준을 위한 아스팔트 포장의 임계 변형강도의 산정방안,” 석재연 논문집, 제 12권1호, 21-31
- 정재현, 이종섭, 박남원, 김광우 (2007c), “아스팔트 대형분자 변화에 따른 소성 변형 특성의 변화,” 한국도로학회 봄 학술대회 논문집.
- “한국형 포장설계법 개발과 포장성능개선방안 연구-아스팔트 포장의 재료 생산 및 시공관리 정립 연구,” (2007) 건설교통부.
- “한국형 포장설계법 개발과 포장성능개선방안 연구-아스팔트 포장의 재료 생산 및 시공관리 정립 연구,” (2008) 건설교통부.

[별첨]

자체평가의견서

1. 과제 현황

사업 명	건설기술혁신사업			
연구 과제	과 제 명	아스팔트 콘크리트의 고온 내변형성 평가기법개발		
	주관연구기관	강원대학교	주관연구책임자	김광우(金光宇)
연구 기간	2005. 12.30 ~ 2008. 12.29			
협동연구기관	기 관 명		연 구 책 임 자	
	(외)			
위탁연구기관	기 관 명		위탁연구책임자	
	(외)			
참여기업	기업체명		대 표 자	
	(외)			
연구비 (천원)	연차	정부	민간	계
	1차년도	212,000		
	2차년도	243,000		
	3차년도	213,000		
	계	668,000		

2. 평가일 : 2008년 11월

3. 평가자(연구책임자) 확인

본인은 평가대상 연구과제의 연구결과에 대하여 객관적으로 기술하였으며, 공정하게 평가하였음을 확약합니다.

소 속	직 위	성 명	확약(서명, 인)
강원대학교	교수	김광우	김광우

I. 연구개발 실적

평가항목	가중치 (A)	평가척도(B)					득점 (A×B)	평가의견
		수	우	미	양	가		
		5	4	3	2	1		
연구수행								
① 연구개발 결과의 우수성 및 창의성	2	√					10	시험법이 독창적이고 간편하고 쉬우며, 실내시험을 통한 현장 공용성을 예측 가능함
② 연구개발 수행노력의 성실도	2	√					10	당초 연구계획대로 체계적으로 성실히 수행하였음
③ 연구개발 결과에 대한 활용가능성	2	√					10	개발된 기술을 통한 혼합물 제작시 우수한 품질 확보가 제공됨
④ 연구개발 결과의 파급효과	2	√					10	아스팔트 혼합물의 품질관리에 손쉬운 시험방법으로 선호성이 높아 국내외적으로 널리 사용될 가능성이 매우 큼
⑤ 공개 발표된 연구개발성과 (논문 게재 또는 산업재산권 출원 및 심사 가능성, 발표 회개최 등)	2	√					10	국외 proceeding 논문집 3편 국내 학술발표 논문집 4편 국내 논문집 1편 국외 SCI 논문집 인터넷판 1편 기타 논문집 1편 게재
연구목표 달성도(연구개발계획서상에 기술된 연구목표)								
⑥ 잔류변형강도 비선형 연구	2	√					10	
⑦ SMA 혼합물의 공용성과 S _D 의 상관성 연구	2	√					10	
⑧ 배수성 혼합물의 공용성과 S _D 의 상관성 연구	2		√				8	
⑨ 시험포장의 공용성과 SD의 상관성 연구	2	√					10	포설한 시험포장 지역 및 일반 지역의 포장 노면상태 분석과 코어를 채취하여 SD를 측정하여 공용 성과 SD의 상관성을 분석
⑩ 일반포장의 노면상태와 S _D 의 상관성 연구	2	√					10	국내외의 일반 도로포장의 정상 지역과 소성변형 지역의 노면상태를 조사하고 코어를 채취하여 SD와 소성변형과의 상관성 분석
소계 전문가 평가점수 (100점 만점)	20						95	

II. 종합의견

1. 연구개발결과에 대한 종합의견

- ▶ 1차년도 주요연구 목표는 변형강도의 시험변수 정립 및 모형주행에 의한 공용성 평가를 통한 2-3차년도 연구의 기반을 확보하는 데 있다. 이를 위해 1차년도의 연구는 기존연구에서 제시된 시험법의 반복성 검증 실험, 공극(밀도)과의 상관성 연구, 최적재하속도의 선정, APA 시험과의 상관성 분석, 현장주행시험용 시험피트 설치 및 시험포장 및 현장코어에 의한 현장 공용성과 상관성 평가 가능성의 추정으로서 다음과 같이 완료한 상태이다.
- ▶ 변형강도는 아스팔트 혼합물의 공극률 변화와 밀접한 관계가 있으며 다짐의 증가로 높은 공극률에서 4%로 가까워지며 변형강도가 높아져 4%를 약간 지난 점에서 최대의 변형강도를 이루는 것을 알 수 있었다. 골재최대치수별로 보면 19mm 혼합물은 3.5% 약간 미만, 13mm 혼합물은 3.5% 약간 이상에서 정점을 이루고 있어 평균으로 보면 약 3.5%에서 정점을 이룬다. 또한 혼합물이 다짐불량 등의 이유로 공극률이 높아져 7% 이상이 되면 S_D 는 최고치의 0.5 이하 수준으로 낮게 나타남을 알 수 있었다. 따라서 아스팔트 혼합물의 소성변형 저항성이 공극과 밀접한 관계가 있고 변형강도도 아스팔트 혼합물의 공극률과 관계가 있어 이를 배합설계의 변수로 적용할 경우 공극과 함께 활용할 수 있을 것으로 판단되었다.
- ▶ 노화의 시간이 길어질수록 혼합물의 강성이 증가하는데 이것이 바인더의 대형분자량 증가로 나타났고 이와 함께 변형강도 값도 증가함을 확인하였다. 이는 장기간 노화된 혼합물의 소성변형 저항성을 변형강도로 추정 할 수 있음을 보여주는 결과라고 할 수 있다.
- ▶ 현장모형주행장치에 의한 침하깊이는 각 혼합물에 대하여 잘 대변하는 것으로 판단되었다. 또한 현장 포장의 소성변형 정도에 따른 채취된 코어로부터 공극 및 변형강도와의 상관성이 높게 나타나, 기존에는 포장의 현상태에 대한 현장공용성을 평가하는 방법이 전혀 없었는데 본 연구의 변형강도 측정으로부터 현장공용성을 평가 가능성이 추정된다.

- ▶ 변형강도와 APA 침하깊이와의 상관성은 $R^2=0.78$ 로 높게 나타났다. 또한 변형강도는 공극률 변화에 따른 $R^2=0.76$ 로 높았아 변형강도가 공극률 변화에 따라 예측이 가능한 것으로 판단되었다. 변형강도의 반복성 연구를 통하여 변형강도가 높은 상관성이 있음을 확인하였다.
- ▶ 최적재하속도 연구에서 일반적으로 재하속도가 증가함에 따라 변형강도 값도 증가를 보였다. 따라서 최적 재하속도 연구와 더불어 2차년도에 수행될 최적수침시간에 대한 연구가 병행해야 할 것으로 판단된다.
- ▶ 2차년도는 변형강도 시험조건 정립을 위해 최적 수침시간의 선정, 하중봉의 직경에 따른 골재치수별 영향분석, 가열 방법의 선정, 최적 재하속도 선정연구를 수행 하였고 현장 공용성과의 상관분석을 위해서는 현장 포설 및 시험포장 지역 및 시험포장이 아닌 일반 도로포장 중에서 포장의 이력을 확인할 수 있는 지역을 선정하여 정상지역과 소성변형 발생지역에서 노면상태를 조사하고 각각 코어를 채취한 후 그 코어로부터 S_D 를 측정하여 소성변형과의 상관성을 분석하였다. 또한 모의주행 시험 피트(test pit)에 다양한 혼합물을 포설하여 반복주행시험 및 시험 피트 포장 및 모형주행에 의한 공용성과 S_D 의 상관성 분석하였다. 그리고 동적크리프 시험 결과와 변형강도(S_D)의 상관성 분석하였다. 회복탄성계수(M_R) 시험을 수행하였다
- ▶ 건조가열로 측정한 S_D 는 수침가열 변형강도 (Wet S_D)에 비해 전체적으로 약 4% 내지 8% 높은 값을 보였다. 하지만 각 혼합물별 변형강도 표준편차의 평균치는 13, 19mm 혼합물의 경우 수침가열보다 각각 8%와 39% 더 크다. 변동계수도 수침 가열보다 건조가열의 변동계수가 더 커서 변동성이 높게 나타났다. 또한 공시체 직경 100mm의 평균은 150 공시체의 평균보다 훨씬 적게 나타나 공시체 직경에 따른 차이가 큰 것을 알 수 있었다.

- ▶ 하중봉의 원형절삭 반경 분석에서 같은 골재 내에서 r 의 차이에 따른 변동성이 전반적으로 10.5mm가 다소 커서 r 의 증가에 따라 평편한 밑면이 줄어드는 것이 변동성을 증가시킨 원인인 것으로 보여 진다. 특히 골재 크기에 의한 영향도 $r=10\text{mm}$ 이 적어 하중봉은 $D=40\text{mm}$ 에 $r=10\text{mm}$ 가 안정적인 시험결과를 얻는 것으로 나타났다.
- ▶ 재하속도별 변형강도 값은 재하속도가 증가함에 따라 변형강도도 증가하는 경향을 보인다. 하지만 일반적으로 분당 70mm에서는 분당 50mm 재하속도와 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다. 따라서 재하속도가 느릴수록 일반적인 강도시험에서 나타나는 것과 마찬가지로 응력이완 현상에 의해 강도가 낮게 측정되는 것으로 나타났다. 재하속도별로 얻어진 S_D 값의 WT 침하깊이와의 상관관계는 분당 30mm의 속도가 R^2 이 가장 높게 나타났다. 이를 종합해서 회귀분석을 하고 최고의 R^2 을 찾으면 가장 높은 점은 31.85mm로 계산되었으나 실용적인 수치인 30mm를 최적의 속도로 선정하였다.
- ▶ 모의주행시험장치(Field-simulated circular wheel tracker: FCWT)에 4가지 혼합물을 포설하고 분당 9회 36시간을 주행하고 시간마다 침하깊이를 측정하여 분석한 결과 FCWT 측정결과가 혼합물의 변별력을 잘 나타냄을 알 수 있어 이를 두 조로 확대하고 실험을 수행하였다.
- ▶ 현장 코어채취를 위해 시험포장을 수행하였으며 소성변형이 발생하는 내년부터 변형강도와의 상관성 분석을 수행한다. 그 외에 여러 곳에서 코어를 채취하여 변형강도를 측정하고 소성변형 깊이를 측정하여 상관성을 분석한 결과 2년간의 R^2 이 0.7로 양호하게 나타났다.
- ▶ 변형강도 강도가 큰 것은 동적크리프가 작아 혼합물의 변형의 진행에 느린 것으로 나타났다. 이로부터 변형강도가 높으면 동하중하에서 혼합물의 변형이 늦게 진전되므로 소성변형에 강할 것임을 동적크리프와 변형강도 시험을 통해서 알 수 있었다.

2. 평가시 고려할 사항 또는 요구사항

- 본 연구는 개발기술을 사업화하기 위한 분야가 아니라 아스팔트 콘크리트의 공용성과 상관성이 높은 새로운 강도특성을 측정하는 시험방법을 개발하기 위한 연구임.
- 따라서 개발기술의 보급에 따른 사업화, 기술이전, 생산성 향상, 예상 수익 등을 평가항목으로 본 연구 결과가 평가되지 않기를 바람.

3. 연구결과의 활용방안 및 향후조치에 대한 의견

- 본 연구 결과로부터 개발된 변형강도(S_D) 시험법은 김테스트로 명명하였으며 국내의 일반 아스팔트 혼합물의 배합설계방법에 중요 변수로서 국토해양부 지침 안에 본 시험법이 선정되어 포함되었다.
- 아울러 미국 South Carolina 도로국에서도 본 시험법을 활용하기 위한 노력을 하고 있으며 수차례에 걸친 Meeting에서 그들이 실제 도로에 사용하는 50가지 이상 혼합물 공시체의 S_D 를 측정하고 APA와의 좋은 상관성을 확인하였으며 적용방법을 모색하고 있음.
- 따라서 본 연구 결과는 국내는 물론 외국의 표준 시험 방법으로 활용 가능성이 높음.