

OGFC 혼합물의 변형강도 특성 연구

Characterization of Deformation Strength of OGFC Mixtures

박남원* · 백성현** · 이순제*** · 도영수**** · 김광우*****

Park, Nam-won · Baek, Sung Hyun · Lee, Soon-jae · Dog, Young S · Kim, Kwang W

1. 서론

전 세계적으로 '지속가능한 개발'이라는 명제 아래 환경 친화적인 도로건설이라는 인식이 점점 커지고 있어 보다 안전하고 인간친화적인 도로 포장이 개발 발전되고 있다. 즉, 과거의 도로는 이동의 수단으로만 인식이 되었지만 현재는 삶의 질이 향상되어 도로를 이용하면서 조용하고 안전한 인간중심의 개념으로 바뀌고 있다. 더욱이 도로가 우리 삶의 영역에 근접하게 되면서 소음공해의 문제에 직면하게 되면서 이러한 문제는 점점 증가해 국가와 주민들 간의 분쟁으로까지 비화되고 있다. 또한 도로교통안전관리 공단에서는 전체 교통사고 중 우천시 미끄러짐에 의한 사고가 약 30%를 차지하고 있다고 밝혔다. 이중 우천시 노면 반사에 의하여 시인성에 문제가 되어 일어난 사고를 포함한다면 더욱 늘어날 것이다. 이것은 국민들이 조용하고 안전하면서도 견고한 도로를 필요로 하고 있음을 보여주는 한 예이며, 도로가 인간중심으로 변모하고 있다는 것이다.

이런 시대적 흐름에 맞게 미국에서는 OGFC (Open Graded Friction Courses) 혼합물이 개발되어 시공되어지고 있는데 OGFC 혼합물의 특성은 표면 마찰저항성 향상, 수막현상(Hydroplaning) 최소화, 물 분사(sprinkle) 현상 감소, 야간 주행시 시인성 향상 그리고 소음 감소효과 등이다. 이는 이러한 다양한 기능으로 사용되며 운전자의 안전 운전에 도움을 줄 뿐만 아니라 경제적으로도 큰 장점이 있다. 이러한 기능의 핵심은 높은 공극률(16-18%)의 유지를 통해 비가 오면 단시간 내에 표면으로부터 물이 포장체를 통해 배수되게 하기 위함이다. 게다가 이 공극은 포장체가 흡음효과를 낼 수 있도록 해주고 표면의 거칠기는 마찰력을 향상시키는 효과도 가져온다.

하지만 OGFC는 미국의 경우 2.5cm로 매우 얇게 마모층으로 사용되어 소성변형에 문제가 없는 것으로 보고되나 국내에 도입되어 5cm 정도의 두께로 적용할 경우 소성변형에 대한 우려가 크다. 따라서 본 연구의 목적은 이 혼합물을 Asphalt pavement analyser(APA)로 시험하여 소성변형 저항성을 평가하고 같은 혼합물에 대하여 측정된 변형강도(Strength against deformation: S_D)와의 상관성을 통해 S_D 가 이러한 특수 혼합물에도 적용가능한지를 평가하는 시험을 수행하는 것이다.

2. 재료 및 방법

2.1 사용재료

본 연구에서는 PG 64-22 바인더 (국내의 침입도 60-80 바인더와 유사)를 기본 아스팔트로 사용하여 개질을 하였는데, CRM (Crumb rubber modifier) 12% 습식첨가 개질아스팔트와 수년간의 연구 및 실제 포장에서 많이 사용되어 우수한 성능이 입증된 Low-density polyethylene (LDPE) 6% 건식첨가 개질아스팔트, Styrene-butadiene-styrene (SBS)로 개질하여 상용화되어 있는 PG 76-22 아스팔트 바인더를 사용하였다. 골재의 품질

* 정회원 · 강원대학교 대학원 지역건설공학과 석사과정 033-250-7284 (fair4park@hanmail.net)

** 정회원 · 강원대학교 대학원 지역건설공학과 박사과정 033-250-7284 (jujufam@nate.com)

*** 정회원 · Research Assistant Professor, Clemson University, Clemson, SC, USA (soonjae93@gmail.com)

**** 정회원 · 강원대학교 지역건설공학과 초빙교수 · 공학박사 033-250-7285 (youngsdoh@hanmail.net)

***** 정회원 · 강원대학교 지역건설공학과 교수 · 공학박사 033-250-6467 (asphaltech@hanmail.net)



이나 입도는 아스팔트 혼합물의 특성에 중요한 영향을 미친다. 특히 이와 같은 OGFC 특수 혼합물의 경우는 더욱 중요하며, 미국에서도 원산지 5곳의 골재들 중에 강도가 높은 Blacksburg 골재를 사용하였다. 이곳에서 생산된 굵은골재와 잔골재 (Screenings)를 사용하였으며, 굵은골재 최대치수는 10mm, 13mm를 South Carolina 교통국(SCDOT) 규정에 맞게 표 1과 같이 입도를 조정하여 사용하였다.

표 1. 골재의 입도 분포

체	표층용 개립도 기준*		배합입도 10 mm	배합입도 13 mm
	하한	상한		
19mm	100	100	100	100
13mm	85	100	100	89
9.5mm	55	75	72	72
#4	15	25	18	18
#8	5	10	7	7
#200	2	4	2.56	2.56

* 미국 SCDOT OGFC 입도

2.2 배합설계

배합설계는 미국 SCDOT 규정에 따라 준비된 각 바인더의 아스팔트 함량을 5.5% - 7.0% 까지 0.5% 씩 변화시켜 Pyrex 유리 접시(직경 20-23cm)에 비벼진 혼합물을 6번에 나누어 담고 173℃오븐에 한 시간 둔 후 꺼내어 그릇의 밑면을 보고 육안으로 아스팔트 함량의 적정성을 확인하였다. 그리고 각 OAC로 비벼진 혼합물의 바인더 침강 손실 실험(Drain-down Loss)을 실시하였다. 모든 혼합물은 침강손실을 기준 0.3% 이하에서 구하였다. 또한 선회다짐기(Superpave gyratory compactor: SGC)를 이용하여 공극을 16-18%로 위해 각 혼합물의 OAC로 150mm 공시체를 50회 다짐하여 시험에 사용하기 위해 제조하였다.

2.3 APA (Asphalt Pavement Analyzer)시험

APA 장비는 미국에서 현장의 공용성을 테스트 하는 기본 장비로써 선회다짐기로 제작된 원주형 공시체를 6개를 세 줄로 몰드에 넣어 놓고 그 위에 100psi 압력의 공기를 넣은 직경 3cm 고무호스를 궤도로 이용하여 690KPa의 압력을 가하는 강재바퀴가 그 위에 왕복 주행한다. 주행속도는 1Hz이며 총 140분간 8400 cycles 을 주행 후 침하깊이를 측정하여 혼합물의 소성변형 저항성을 측정한다. 공시체는 직경 150mm ,높이 75mm 의 선회다짐기 공시체이며 시험온도는 64℃에서 수행하며 공시체를 사전에 4시간 이상 시험 온도에서 안정화 시킨 후 사용하였다.

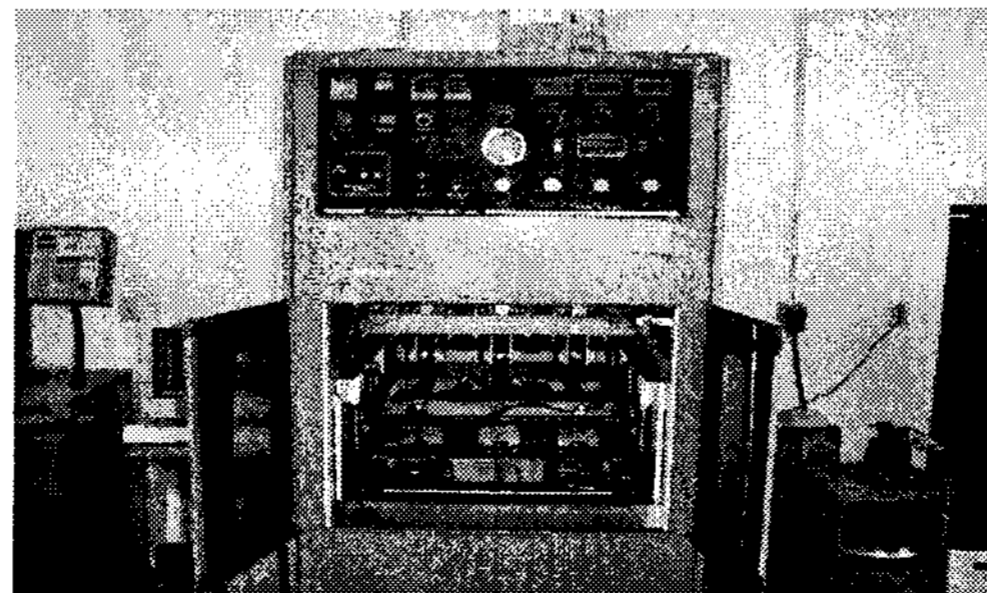


그림 1. APA 시험기

2.4 변형강도 시험(Kim test)

변형강도는 정하중으로 아스팔트 혼합물의 소성변형 저항성을 측정하는 기법으로 Wheel tracking 시험과의 상관성이 높아 변형강도가 높은 혼합물이 도로에서 소성변형에도 강한 것으로 나타났다. 시험은 60℃에서 수행하며 직경 150mm 높이 62mm의 공시체를 평면 중앙에 직경(D) 40mm, 하단 원형 절삭반경(r) 10mm의 하중봉으로 수직 정하중을 30mm/min 속도로 가한다. 이때 그림과 같이 얻어지는 최대하중(P)과 수직 침하

깊이 (y)로부터 다음 식 (1)로 변형강도를 구한다.

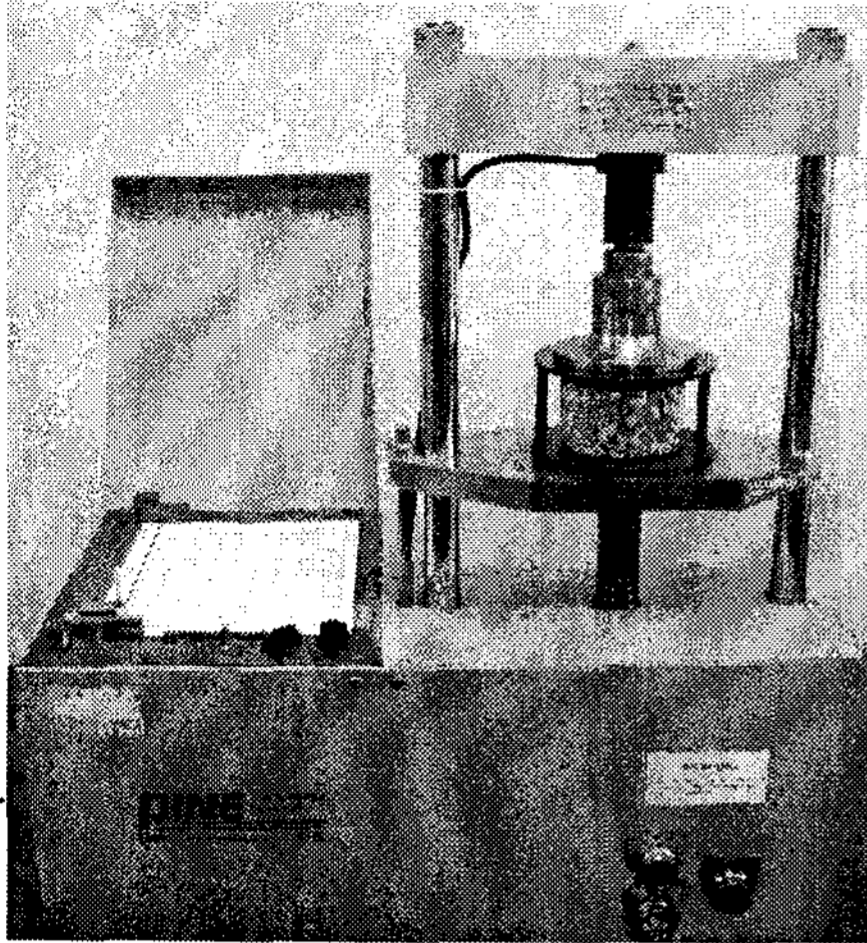


그림 2. 마찰시험기에 Kim-test를 거치한 상태

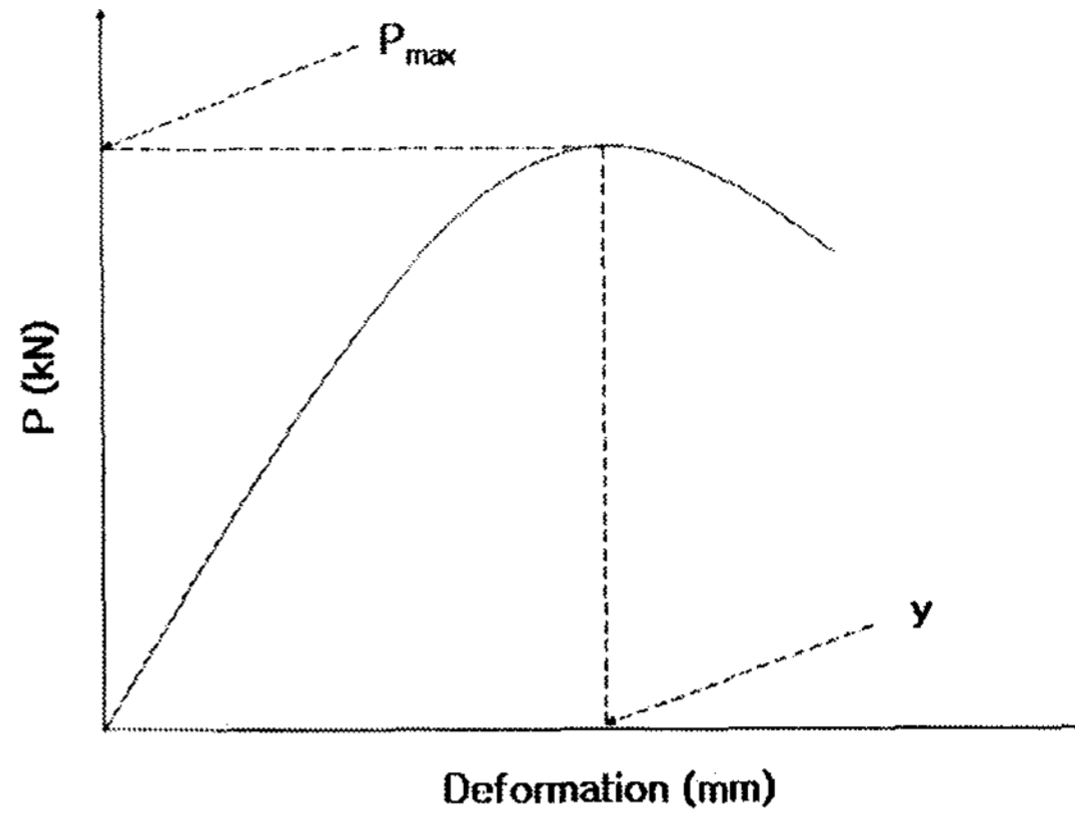


그림 3. Kim-test 하중-변형 곡선

$$S_D = \frac{0.32 \cdot P}{[10 + \sqrt{20y - y^2}]^2} \quad \text{----- (1)}$$

여기서 S_D = 변형강도(MPa), P = 최대하중(N), y = P 에서의 수직변형(mm)이고, S_D 단위는 MPa이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 배합설계 결과

본 연구는 13mm, 10mm 두 가지 골재와 3가지 개질아스팔트를 사용한 OGFC 혼합물의 배합설계로 침강손실 실험을 통해 OAC를 결정하였다. 공극은 Corelock 장비를 이용하여 측정하였다(표 2).

표 2. 혼합물의 물성표

혼합물	OAC (%)	공극율(%)	침강손실 실험 (기준0.3%이하)
13mm PG76-22	6.0	16.34	0.12
13mm L6%	5.9	16.22	0.09
13mm R12%	7.2	16.26	0.03
10mm PG76-22	6.0	17.27	0.15
10mm L6%	5.9	16.72	0.10
10mm R12%	7.2	16.69	0.03

3.2 OGFC 혼합물의 APA 시험 결과

SCDOT에서 규정하는 PG 64-22와 PG 76-22 바인더를 사용한 혼합물의 APA rut depth 기준치는 각 5mm와 3mm 이하이다. OGFC 혼합물은 고점도의 바인더로 사용하여야 하므로 PG 64-22를 기본바인더로 사용하여 개질 아스팔트를 만들어 사용하였는데 개질아스팔트로 만든 혼합물들 중 LDPE 6% 개질아스팔트 만이 기준에 통과하였다. LDPE 6% 개질 아스팔트의 혼합물이 가장 우수하게 나왔고, 다음으로 습식 CRM 12%가 좋게 나왔으며 PG 76-22 인 혼합물이 침하 깊이가 가장 깊었다.

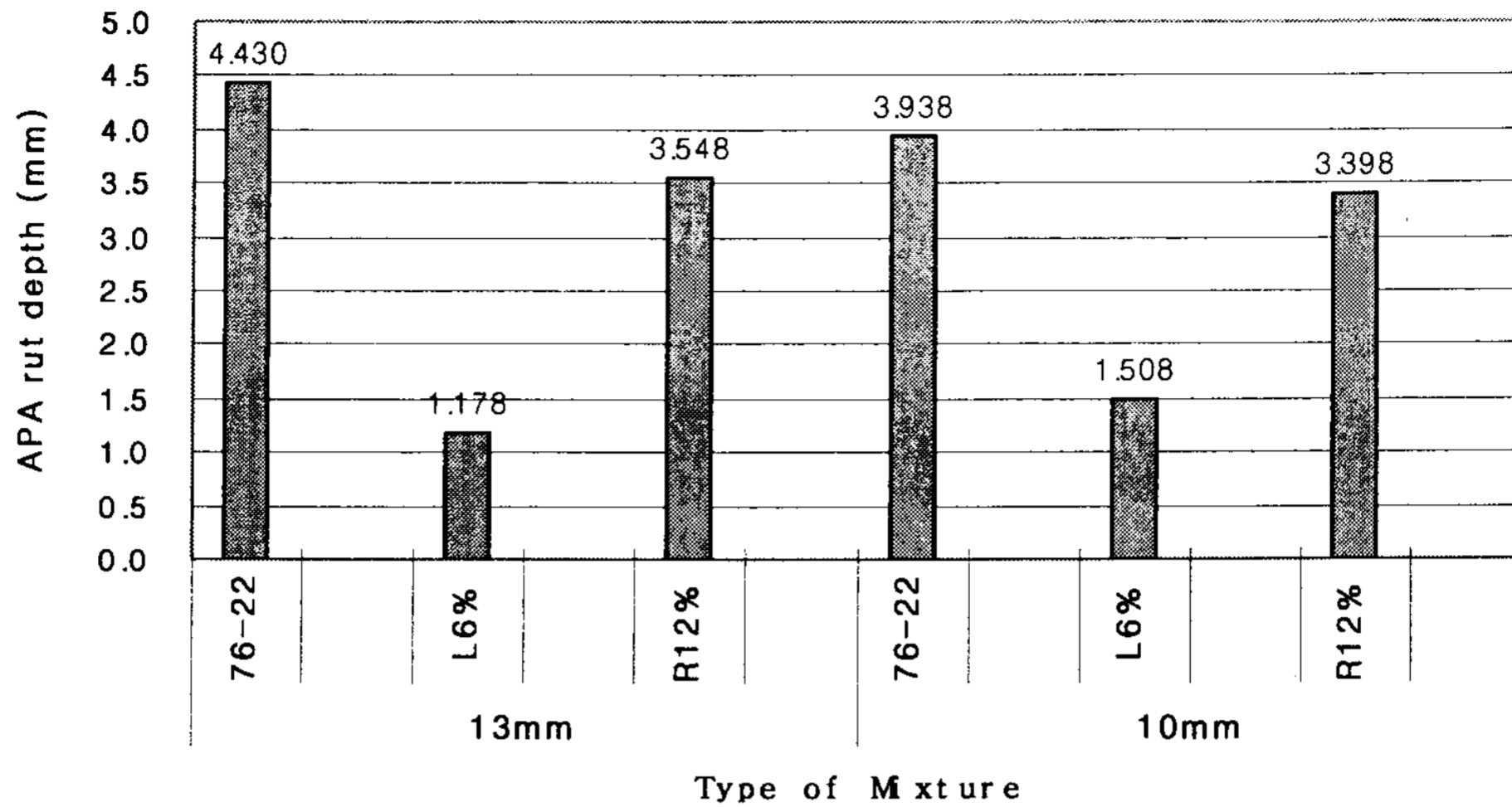


그림 4. APA rut depth 측정결과

3.3 OGFC 혼합물의 변형강도시험 결과

각 혼합물 별로 비빈 후 163°C 오븐에서 2시간동안 단기 노화된 혼합물을 선회다짐기를 이용하여 50회를 다져서 만든 공시체를 25°C 상온에서 양생을 한 후 물성을 확인하였다. 그리고 공시체의 높이를 62mm로 절단하여 Kim test를 진행하였다. 각 혼합물은 공시체 변형강도 평균을 나타낸 것이다.

OGFC 혼합물은 공극이 높아 하중에 의한 변형이 지속적으로 발생하며 균열파괴가 발생하지 않는 관계로 재하하중에 대한 정확한 정점을 찾는 데 어려움이 발생하였다. 그래서 OGFC 공시체를 현장에서 사용되는 것과 같은 두께인 25mm로 절삭하여 밀 입도 아스팔트 혼합물로 제작된 모체에 부착하여 시험을 하였다. 그림 5는 그 결과를 보여준다.

사용된 골재의 크기에 상관없이 습식 L6% 혼합물이 가장 높은 변형강도 값을 보여 주었으며, PG 76-22 개질 아스팔트로 제작된 혼합물이 가장 낮은 값을 나타냈다. 밀 입도 혼합물을 모체로 부착하여 시험한 경우에도 두 재질 간의 밀립현상이 관측되어 세 가지 OGFC 혼합물간의 차이를 비교 하는 데에 어려움이 있었다. 향후 OGFC 혼합물과 같은 공극률이 높은 공시체의 변형강도를 측정하는 경우에는 별도의 수단을 강구하는 연구가 필요할 것으로 사료된다.

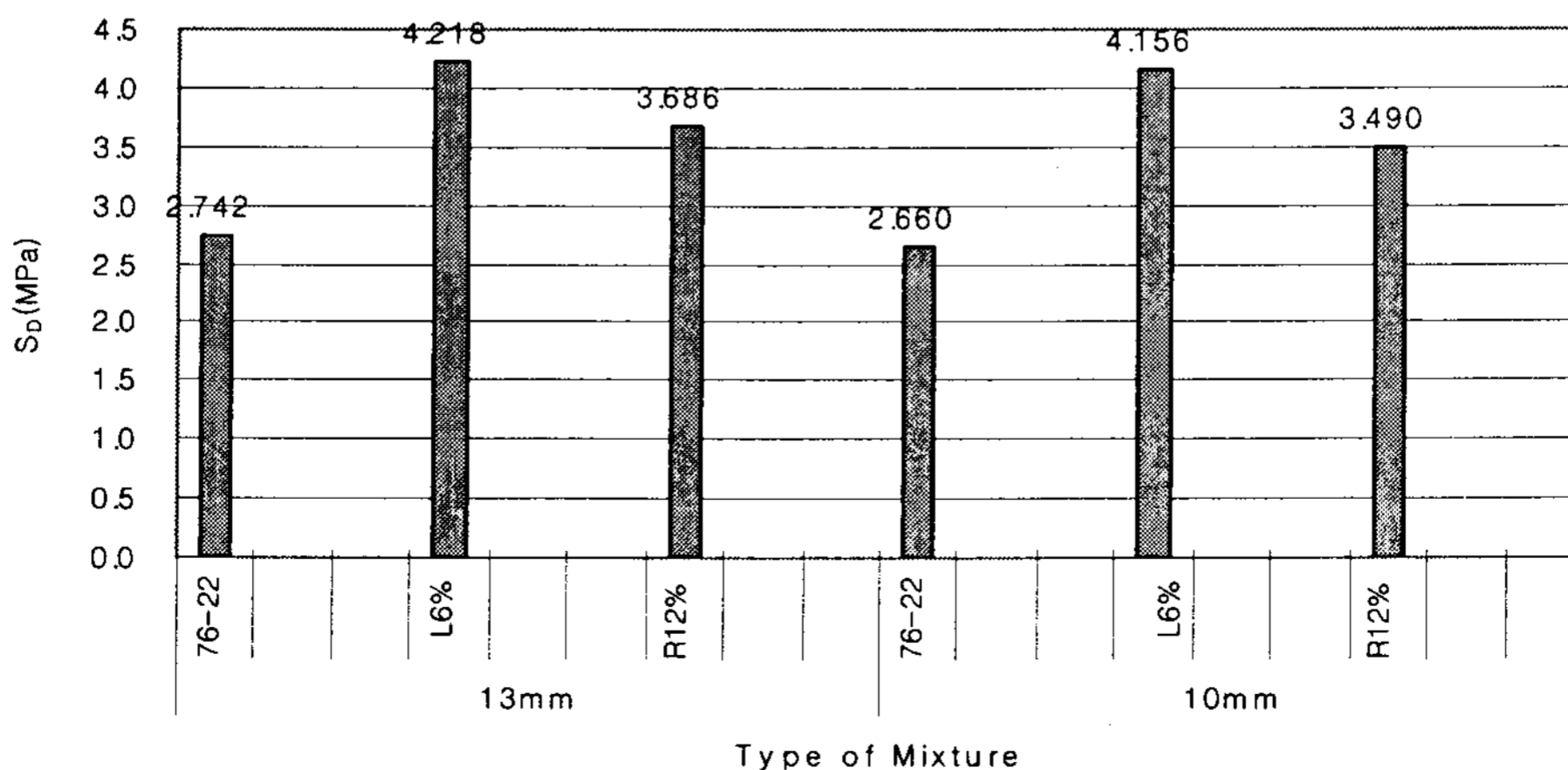


그림 5. OGFC 혼합물의 변형강도시험결과



3.4 상관분석

그림 6은 OGFC 혼합물에 대한 APA 시험결과와 Kim test 시험결과와의 상관성을 보여준다. 일반 혼합물에 관한 기존 연구와는 유사하게 두 가지 골재에서 양호한 R^2 이 나타났다(평균 0.81). 단, APA 침하깊이가 전반적으로 5mm 이하로 낮은 것에 비하여 S_D 의 수준이 밀입도 혼합물에 비해 낮은 편인 것으로 나타났다. 즉, 13mm 밀입도 혼합물에 대한 APA (y) 와 S_D (x)의 관계식은 $y=23.5x^{-1.3246}$ ($R^2=0.7729$)으로 주어진다(11). 이를 적용하여 APA 깊이가 4.43mm인 13mm PG76-22 OGFC 혼합물의 S_D 를 추정하면 $x = (\frac{y}{23.5})^{1/-1.3246} = (\frac{4.43}{23.5})^{-0.755} = 3.525$ (MPa)이다. 이는 OGFC의 $S_D=2.742$ MPa보다 약 28% 높은 값이며 같은 식으로 나머지도 계산을 하면 표 3과 같이 밀 입도가 큰 값이라는 것을 알 수 있다. 이를 통해 OGFC의 S_D 값들은 밀입도 혼합물의 S_D 값들보다 훨씬 낮게 나타나는 것을 알 수 있다. 이는 SMA나 배수성 혼합물들의 마찰안정도 등이 밀 입도에 비하여 훨씬 낮게 나타나는 점과 유사한 현상이라 할 수 있다. 그럼에도 불구하고 중요한 점은 비록 샘플 수는 적지만 APA 시험 결과와의 R^2 이 밀 입도의 0.77보다는 다소 높게 나타나 같은 입도 혼합물의 바인더간 개질 효과를 S_D 를 통해서도 비교할 수 있었다는 점이다.

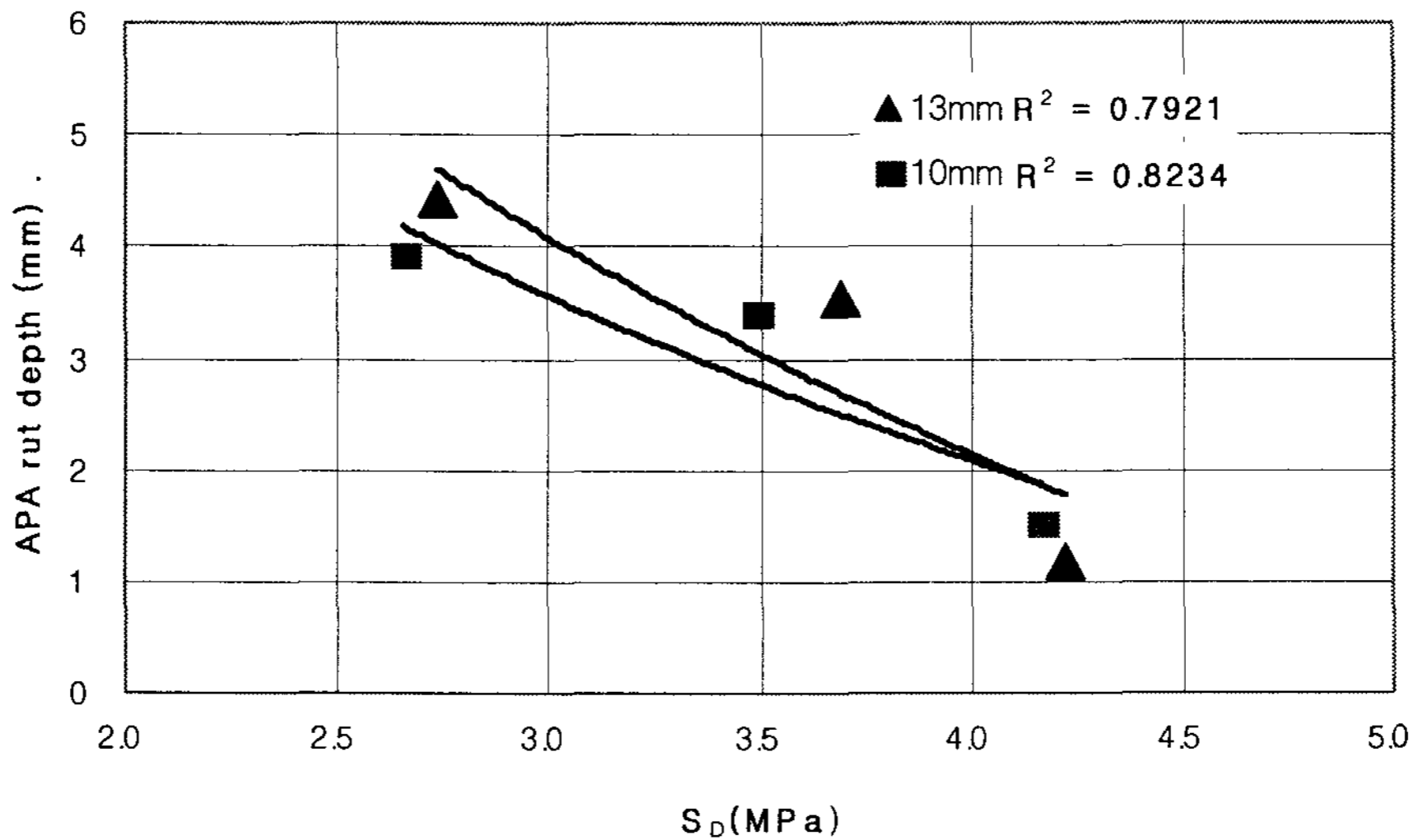


그림 6. APA 침하깊이와 변형강도와의 상관성 분석

표 3. 주어진 APA 수준에서 OGFC와 밀입도 혼합물의 S_D 비교

Classification		APA(mm)		
		4.430	1.178	3.548
S_D (MPa)	13mm OGFC	2.742	4.218	3.686
	13mm Dense	3.525	9.582	4.168

4. 결론

본 연구는 골재 최대 치수 10mm와 13mm를 3개의 개질아스팔트(LDPE 6%, CRM 습식 12%, PG 76-22)를 사용하였으며 OGFC 특수 혼합물에 대해 APA 시험과 Kim-test 시험을 통하여 소성변형저항성을 평가하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- LDPE 로 개질한 OGFC 혼합물의 성능향상은 APA 시험에서 높은 개질효과를 보여주고 있음을 확인하였고 밀 입도에서는 우수한 PG76-22의 바인더가 가장 침하깊이가 깊게 나타난 것을 볼 수 있다. 따라서 입도와 성능에 맞게 개질아스팔트의 선택이 이루어져야 할 것이다.



2. 비록 데이터 수는 적지만 특수포장인 OGFC 혼합물의 APA 시험과 미국에서 사용하는 두께인 25mm로 절단한 공시체에 대한 변형강도(S_D)와의 상관성 분석을 통하여 두 시험치 간의 관계를 분석한 결과 밀 입도 혼합물보다 다소 높게 평균 $R^2=0.81$ 이 얻어져서 양호한 상관관계를 보였다.
3. 하지만 S_D 의 수준은 밀 입도혼합물에 비하여 상대적으로 낮게 나타나 밀입도에서 적용하는 S_D 의 임계치가 OGFC에서는 그대로 적용될 수 없어 보인다. 이와 같이 강도 값이 낮게 나타나는 것은 SMA나 배수성 혼합물들과 같이 골재골격으로 하중을 지지하는 아스팔트 혼합물에서 마찰안정도 등이 밀 입도에 비하여 훨씬 낮게 나타나는 점과 유사한 현상이라 할 수 있다.
4. 변형강도는 OGFC 혼합물 공극이 너무 높은 관계로 균열이 일어나지 않고 압밀현상이 발생하여 정확한 정점을 읽기가 어려워 변형강도 측정방법상에 보다 많은 연구가 진행되어야 할 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부의 지원과 교육부 BK21 친환경건설전문가 양성사업의 후원으로 미국 클렘슨 대학교 ARTS (Asphalt Rubber Technology Service) 장비를 활용하여 이루어진 것입니다.

참고문헌

1. 김광우, 이명호, 안경애, 최영규, "개질아스팔트 결합재의 특성연구," 석재복합 신소재 제품 연구센터 연구 보고서, 제 1 집,
2. 김광우, 조희원, 이상범, 이지용, 안경애, "폴리머 (LDPE, SBS) 개질 아스팔트 혼합물의 특성 연구," '97 국제 심포지엄 - 아스팔트 포장공학의 첨단기술 - 논문집, 강원대학교 석재복합신소재제품 연구센터, 1997. 8, pp. 251-271
3. 김광우, 최선주, 이문섭, 홍상기, 안경애, 이순제, "개질아스팔트 콘크리트의 변형강도와 소성변형특성 연구," 석재연 논문집, 제 8 집, 강원대학교 석재복합 신소재제품 연구센터, (2003b), pp.71-88.
3. 정재현, 조병진, 박남원, 김광우, "아스팔트 혼합물의 인공노화방안 연구," 한국도로 학회 논문집,9(4), 2007. 12, pp. 45-54.
4. 김광우, 이문섭, 이순제, 김중열, "소성변형과의 상관성 및 추정모델을 통한 변형강도 시험장치 변수 분석," 한국도로포장공학회 논문, 2002, pp. 41-52.
5. 김광우, 이문섭, 최선주, 김준은, "소성변형과의 상관성에 근거한 아스팔트 콘크리트의 강도특성 개발에 관한 기초연구," 한국도로포장공학회 논문집, 제 4권 4호, 2002, pp. 23-40.
6. 김주원, 박태순, "배수성포장 - 외국의 사례를 중심으로 -", 도로포장공학회지, 한국도로포장공학회 제2권 3호, 2000, pp. 91~100.
7. 조희원, "LDPE 및 SBS 개질 아스팔트 콘크리트의 역학적 특성에 관한 연구," 강원대학교 대학원 석사학위 논문, 1999.
8. Park, N. W., Kim, H. H., Baek, S. H., Kim, K. W. and Doh, Y. S., "Correlation of Deformation Strength (S_D) with Lab Data and Field Rutting Data of Asphalt Pavements," UKC Conference, Washington, DC, USA, Aug. 2007.
9. Doh, Y. S., Yun, K. K., Amirkhanian, S. N. and Kim, K. W., "Framework for developing static strength test for measuring deformation resistance of asphalt concrete mixtures," Construction and Building Materials, 21(12), Dec. 2007.
10. Kim, K. W., Doh, Y. S. and Amirkhanian, S. N., "Feasibility of deformation strength for estimation of rut resistance of asphalt concrete," International Journal of Road Materials and Pavement Design, 5(3), Dec. 2004, pp. 303-322.
11. Kim, H. H., Park, N. W., Doh, Y. S., K. Ahn, Lee, S. J. and Amrikhanian, S. N., Kim, K. W., "Rutting Estimation of Asphalt Pavement Mixtures using Deformation Strength," Paper to be presented at 2008 European Asphalt Technology Association Meeting, Lyon, Paris, April. 2008.