

지불규정 인자와 아스팔트 포장 공용성과의 상관관계 분석

Analysis of the Correlation Between Pay Adjustment Factors and Performance of Asphalt Concrete Pavement

신형호* · 이석근** · 김성민***

Shin, Hyoung-Ho · Rhee, Suk-Keun · Kim, Seong-Min

1. 서론

본 연구는 포장 성능 개선을 위한 지불규정(Pay Adjustment)개발의 기초연구로 수행되었다. 지불규정은 아스팔트 함량과 밀도, 입도, 두께, 평탄성 등과 같은 지불규정 인자의 측정값에 따라 통계적 품질측정 방법인 PWL에 따른 지불계수(Pay Factor)를 이용해 공사비를 차등 지급하기 때문에 지불규정 인자의 편차에 따른 실제 포장의 공용성 변화를 공학적으로 증명해야 할 필요가 있다. 이를 위해 국내 시험포장 구간과 일반 구간의 각 인자에 대한 지불계수를 산출하여 비교해 보았으며, 지불계수 차이에 따른 포장의 공용성 경향을 확인하기 위하여 지불규정 인자에 편차 값을 주어 휨 피로 시험과 소성변형 시험을 수행하였다. 지불규정 인자로는 아스팔트 함량과 밀도, 입도, 두께, 평탄성이 있지만 본 연구에서는 도로포장의 공용성에 큰 영향을 미치는 아스팔트 함량과 밀도(공극률)을 기준으로 시험을 진행하였다.

2. 국내 시험포장 구간과 일반포장 구간의 지불계수 산출

본 연구의 지불계수 산출을 위해 국내 시험포장 구간, 국도 신동-가사 구간 중 두 구간에서 다짐 전 시료 20kg을 확보하여 KS F 2490, '연소법을 이용한 아스팔트 함량 결정방법'에 따라 아스팔트 함량 시험을 실시하였으며, 문곡-무릉 시험구간에서 코어를 채취하여 KS F 2366 '역청 포장 혼합물의 이론적 최대 비중 및 밀도 시험방법'에 따라 밀도 시험을 실시하였다. 시험 결과는 다음과 같다.

표 2.1 시험포장 구간의 시험 결과

		No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	평균	표준편차
함량	신동-가사 No. 1	4.73	4.72	5.13	4.89	5.13	4.92	0.2220
	신동-가사 No. 2	4.93	4.92	4.89	4.89	5.12	4.95	0.1116
밀도	문곡-무릉 No. 1	94.15	94.11	93.20	91.26	91.95	92.93	1.7595

(신동-가사 구간의 아스팔트 함량 OAC 5%)

* 비회원 · 경희대학교 토목공학과 도로연구실 석사과정 · 031-201-2923(E-mail : shin_2420@naver.com)

** 정회원 · 경희대학교 토목건축대학 교수 · 공학박사 · 031-201-2900(E-mail : skrhee@khu.ac.kr)

*** 정회원 · 경희대학교 토목건축대학 교수 · 공학박사 · 031-201-2923(E-mail : seongmin@khu.ac.k)



또한 시험포장 구간과의 비교를 위해 일반 포장 구간에서 코어를 채취하여 KS F 2366 '역청 포장 혼합물의 이론적 최대 비중 및 밀도 시험방법'에 따라 밀도 시험을 실시하였다. 시험 결과는 다음과 같다.

표 2.2 일반포장 구간의 시험 결과

		No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	평균	표준편차
밀도	양천-월곡	83.639	84.739	85.106	84.005	84.005	84.30	10.8630
	보성-이양	89.247	90.947	90.522	89.247	88.397	89.67	4.9495
	용인-서울	89.945	87.981	91.516	86.017	87.195	88.53	6.4976
	남향대교 진입로	91.261	91.508	89.447	91.467	90.601	90.86	3.6197

위의 시험 결과에서 일반포장 구간 밀도 시험 결과의 평균값과 표준편차 값을 시험포장 구간과 비교해 본다면 일반포장 구간의 밀도 평균값은 아스팔트 포장의 상한, 하한한계 범위 내에 도달 하지 못하며, 편차 또한 커서 균질한 품질관리가 이루어 지지 않았음을 알 수 있다.

위의 시험 결과를 지불규정을 적용하여 지불계수를 산출했으며 지불계수 산출은 미국 PWL 방법을 이용, 품질측정테이블은 미국 South Carolina DOT 의 것을 사용하였다. 최종 지불계수 계산식은 미국 AASHTO 의 「P.F=55+0.5×TPWL」 을 사용하였다. 아래 표는 시험포장 구간과 일반포장 구간의 함량과 밀도에 대해 산출한 지불계수(Pay Factor)이다.

표 2.3 시험포장 구간의 지불계수 산출

신동-가사 No.1 / 함량		평균(\bar{X})	표준편차(s)	하한한계	상한한계
		4.92	0.2220	4.5	5.5
Q-Value		시방한계 백분율		전체 백분율	PAY
Q _L	Q _U	LPWL	UPWL	TPWL	FACTOR
1.89158	2.61218	100	100	100	105
신동-가사 No.2 / 함량		평균(\bar{X})	표준편차(s)	하한한계	상한한계
		4.95	0.1116	4.5	5.5
Q-Value		시방한계 백분율		전체 백분율	PAY
Q _L	Q _U	LPWL	UPWL	TPWL	FACTOR
4.02895	4.92427	100	100	100	105
문곡-무릉 No.1 / 밀도		평균(\bar{X})	표준편차(s)	하한한계	상한한계
		92.93	1.7595	92	96
Q-Value		시방한계 백분율		전체 백분율	PAY
Q _L	Q _U	LPWL	UPWL	TPWL	FACTOR
0.53080	1.74244	69	100	69	89.5

표 2.4 일반포장 구간의 지불계수 산출

양천-월곡 / 밀도		평균(\bar{X})	표준편차(s)	하한한계	상한한계
		84.30	10.86301	92	96
Q-Value		시방한계 백분율		전체 백분율	PAY
Q _L	Q _U	LPWL	UPWL	TPWL	FACTOR
-0.70893	1.07716	26	86	12	61
보성-이양 / 밀도		평균(\bar{X})	표준편차(s)	하한한계	상한한계
		89.67	4.9495	92	96



Q-Value		시방한계 백분율		전체 백분율	PAY FACTOR
Q _L	Q _U	LPWL	UPWL	TPWL	
-0.47034	1.27849	33	92	25	67.5
용인-서울 / 밀도		평균(\bar{X})	표준편차(s)	하한한계	상한한계
		88.53	6.4976	92	96
Q-Value		시방한계 백분율		전체 백분율	PAY FACTOR
Q _L	Q _U	LPWL	UPWL	TPWL	
-0.53391	1.14952	32	88	20	65
남향대교 진입로 / 밀도		평균(\bar{X})	표준편차(s)	하한한계	상한한계
		90.86	3.6197	92	96
Q-Value		시방한계 백분율		전체 백분율	PAY FACTOR
Q _L	Q _U	LPWL	UPWL	TPWL	
-0.31582	1.42085	39	95	34	72

위의 결과에서 알 수 있듯이 지불규정을 적용하여 지불계수(Pay Factor)를 산정한 결과 시범포장 구간의 지불계수가 일반포장 구간 보다 높게 산정된 것을 알 수 있다. 함량의 경우 시험포장 구간의 시험 결과만이 있어 비교는 할 수 없지만, 시험포장구간의 경우 아스팔트 함량 OAC 값에 근사한 시험 결과 값을 얻어 표준편차가 낮고 지불계수가 100%를 넘었으며, 밀도의 경우 시험포장 구간에서는 상·하한한계에 근사한 시험 결과 값으로 낮은 표준편차, 90% 수준의 높은 지불계수 값을 얻었지만 일반포장 구간에서는 상·하한한계에 미치지 못하거나 크게 벗어나는 시험 결과 값으로 표준편차가 높고 80%를 넘지 못하는 낮은 지불계수 값을 얻었다. 이렇게 일반포장 구간의 지불계수가 낮게 산정된 것으로 보아 도로의 성능과 품질이 시험포장 구간 보다 떨어진다고 판단할 수 있으며, 높은 공용성을 기대할 수 없을 것이다.

3. 시험을 통한 공용성 변화 경향 분석

3.1 험 피로 시험

(1) 시험 방법 및 시편 제작

시험은 지불규정 인자 중 아스팔트 함량과 밀도(공극률)에 대하여 진행되었으며, 변수로 채택된 인자 이외의 피로균열에 영향을 미칠 수 있는 요소는 최소화하기 위한 시험을 진행하였다.

표 3.1 4점 험피로 시험을 위한 인자별 변수 및 편차

지불규정인자	각 인자의 편차	변수개수	비고
아스팔트 바인더 함량	4.0%, 4.5%, 5.0%, 5.5%	4	공극률 4~6% 조정
밀도(공극률)	1~3%, 4~6%, 7~9%	3	아스팔트 바인더 함량 5.1% 고정

시험방법은 4점 험 피로시험, 변형률 제어 방식으로 160 $\mu\epsilon$ ~180 $\mu\epsilon$ 의 변형률을 제하 시켰다. 시험장비로는 INSTRON장비를 사용하였으며 시험데이터의 수집 및 저장은 National Instruments사의 SCXI 사시와 LabVIEW 프로그램을 사용하였다. 시험을 수행하기 위한 변형률제어는 INSTRON컨트롤러에 연결된 컴퓨터에서 MAX프로그램을 사용하였고, 시험 중 사이클마다 발생하는 하중, 보의 처짐, 바닥판과 아스팔트 혼합물의 변형률은 National Instruments사의 SCXI사시를 통하여 수집되도록 하였다. 이렇게 수집된 데이터는 SCXI사시에 연결된 컴퓨터에서 LabVIEW 프로그램으로 각 센서의 측정값과 강성, 위상각 및 손실에너지가 계산되어 화면에 보여진다.

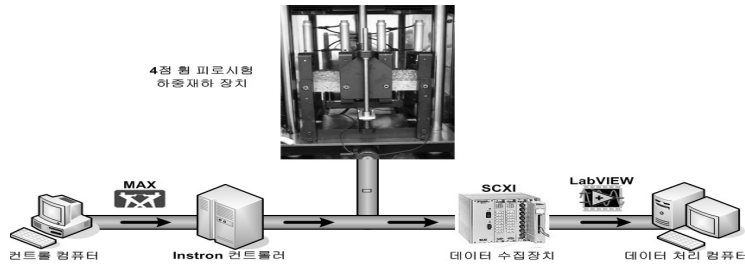


그림 3.1 4점 휨 피로시험장비 개념도

변위측정은 RDP Electronic사의 LVDT를 사용하였다. 각 센서에서 발생하는 데이터의 동기화를 위하여 National Instruments사의 데이터 수집카드(16bit), 데이터 수집장비(SCXI채시) 및 모듈, LabVIEW 프로그램을 사용하였다.

아스팔트 혼합물의 피로수명을 평가하는 방법으로는 가장 일반적인 방법인 혼합물에 대해 피로시험을 수행하여 얻어진 데이터로부터 강성(stiffness)을 계산하고 이를 통해 시편의 강성이 초기 강성의 50% 도달했을 때까지 시편에 가해진 하중재하회수를 피로수명으로 결정하는 방식을 채택하였다.(SHRP-A-404, 1994).

시험용 시편은 가로 30cm, 세로 50cm, 높이 5cm의 직사각형 몰드를 이용해 무단변속다짐기로 다짐하였으며, 다짐횟수를 달리해 제작한 시편의 공극률을 확인한 결과 왕복 15회 다짐 시 공극률은 2~3%로 과다짐의 경향을 보이는 반면, 왕복 10회 다짐의 경우 4~6%로 적절한 공극률을 보이는 것으로 확인되었다. 따라서 무단변속다짐기의 다짐횟수는 왕복 10회로 고정하여 시험 시편을 제작하였다.

(2) 아스팔트 바인더 함량에 따른 시험결과

아스팔트 함량 변수의 경우 실험을 진행한 모든 시편이 혼합물의 강성이 하중재하 횟수가 증가함에 따라 감소하였으며, 표 3.2와 같이 함량이 증가함에 따라 강성은 작아지고, 피로수명은 늘어나는 결과를 보였다.

표 3.2 아스팔트 바인더 함량 변수별 휨 피로 시험 결과 값

	Micro Strain(με)	초기강성	Nf	비 고
4.0%	146	9615.40	55,503	
4.5%	152	7682.82	89,502	
5.0%	150	8692.11	127,001	
5.5%	154	4923.40	185,004	

이러한 결과 값은 아스팔트 혼합물의 아스팔트함량이 낮으면 그 배합은 내구적이지 못하고, 아스팔트함량이 많으면 안정적이지 못 함을 보여준다. 혼합물의 아스팔트 함량이 너무 과다하게 되면, 골재 입자간의 내부마찰력이 감소되며, 이로 인해 강성이 작아진다고 판단된다.

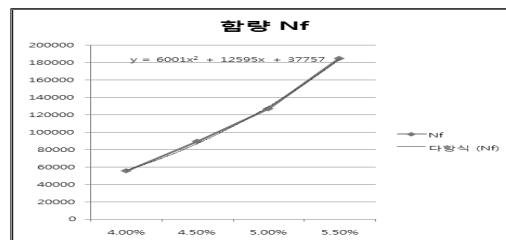


그림 3.2 아스팔트 바인더 함량 변수의 피로수명 경향

(3) 아스팔트 밀도(공극률)에 따른 시험결과

아스팔트 밀도(공극률) 실험은 함량을 5.1%로 고정한 상태에서 변수를 1~3%, 4~6%, 7~9%로 두어 실험을 진행했다. 밀도 변수의 경우 표 3.3과 같이 공극률이 높을수록 시편의 강성이 작아지고, 공극률 4~6% 시편에서의 피로수명이 가장 길게 나오는 결과를 나타내었다.

표 3.3 아스팔트 밀도(공극률) 변수별 휨 피로시험 결과 값

	Micro Strain($\mu\epsilon$)	초기강성	Nf	비 고
1~3%	154	6318.30	340,506	
4~6%	153	4601.00	557,004	
7~9%	153	3772.08	220,010	

혼합물 내의 공극은 공용성과 밀접한 관계가 있는 물리적 성질로서, 본 시험을 통해 공극률이 7~9% 이상일 때 아스팔트 포장의 조기파손 가능성이 높고, 밀도가 안정도와 내구성에 큰 영향을 미칠 수 있다고 판단된다.

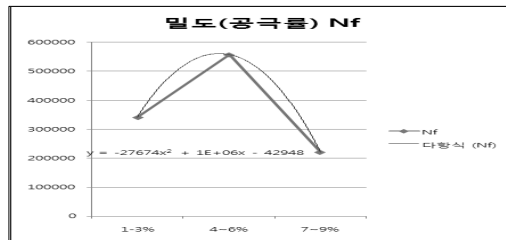


그림 3.3 아스팔트 밀도(공극률) 변수의 피로수명 경향

3.2 소성 변형 시험

(1) 시험 방법 및 시편 제작

시험의 변수와 편차는 인자별 적정 상·하한한계를 선정하기 위해서 4점 휨 피로 시험과 동일하게 진행하였으며, 시편 제작에 있어서도 4점 휨 피로 시험과 동일하게 무단 변속기를 사용하여 제작하였다. 다만 공시체 몰드의 규격이 30cm×30cm×5cm로 4점 휨 피로 시험의 몰드와 차이가 있었으며, 이는 휠트래킹 시험 장비의 규정 규격을 준수하기 위함이었다.

휠트래킹 시험은 동적 반복 크리프 시험의 일종으로, 실제 도로가 고온 환경조건일 때 중 차량 주행으로 인한 소성변형이나 니딩 작용을 시뮬레이션 시킴으로써, 아스팔트 혼합물의 내유동성을 평가하는데 사용된다.

본 연구에서 사용한 휠트래킹 시험은 일본의 건설성에서 사용하고 있는 시험절차를 적용하였으며, 시험 장비로는 그림 3.4와 같이 크랭크 방식의 변속 구동형 시험기(휠 트래킹 시험장비)를 사용하였다. 이를 통해 포장의 표층과 동일한 형상으로 제작된 아스팔트 혼합물의 빔 표면을 소정의 접지압과 고무 경도를 가진 솔리드 타이어로 주행시켜 차륜 침하량의 시간 변화를 측정하였다.

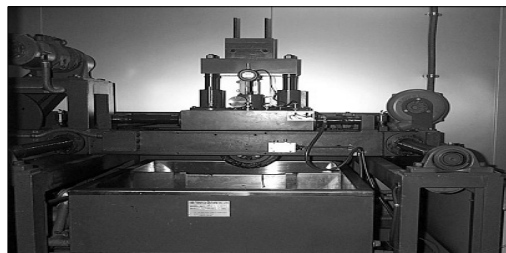


그림 3.4 휠트래킹 시험 장비

본 실험을 하기 전 시편을 24시간동안 상온에서 양생시간을 거친 후 시험개시 5시간 전에 미리 $60 \pm 2^\circ\text{C}$ 를 유지한 항온실에서 재 양생하였다. 시험은 집지하중 $70 \pm 1\text{kgf}$ 에 해당하는 자동차 타이어 형태의 하중을 42 ± 1 회/min의 주행 속도로 가하면서 시간에 따른 변형량을 측정하고 각각의 아스팔트 혼합물 종류에 대해 3회 이상 시험을 수행하여 공시체의 균질성을 확인하였다.

휠트랙킹 시험 결과는 그림 3.5와 같이 시간과 변형량의 관계로 나타낸다. 시험 시간은 보통 60분이 소요되며, 시험 결과에 사용하는 변형량은 45~60분 사이의 측정치를 대상으로 한다. 이 때 측정치에서 구해지는 기울기를 시간당 침하량(Relative Deformation)이라 하며 아래의 식을 이용하여 계산할 수 있다. 단위 침하량의 역수에 차량의 주행 횟수를 곱하여 동적 안정도(Dynamic Stability)를 구하며, 이는 1mm 침하 시 소요되는 왕복 횟수를 의미한다.

$$\text{변형속도, RD} = \frac{d_{60} - d_{45}}{15} \qquad \text{동적안정도, DS} = \frac{42}{\text{RD}} = \frac{15}{d_{60} - d_{45}} \times 42$$

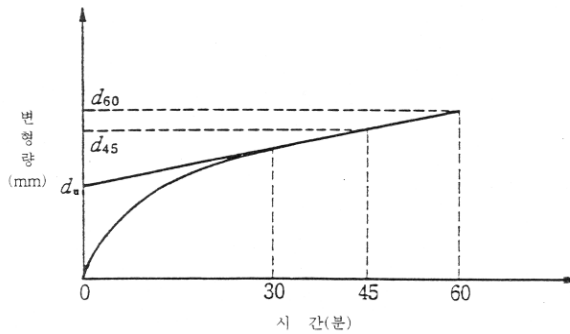


그림 3.5 시간-변형량 곡선

(2) 아스팔트 바인더 함량에 따른 시험결과

아스팔트 함량 변수는 공극률을 4~6%로 고정된 상태에서 0.5%의 편차를 두어 실험을 진행했다. 아스팔트 시멘트 포장에서 함량을 너무 과다하게 첨가 하면 추방소성유동(영구변형)이 발생하게 되며 골재 입자간의 내부마찰력이 감소되며, 이로 인해 골재보다는 아스팔트가 하중을 받게 된다. 아래의 그림 3.6의 소성변형 변형량 곡선에서 보다 시피 함량이 많을수록 변형량이 증가하는 것을 볼 수 있다.

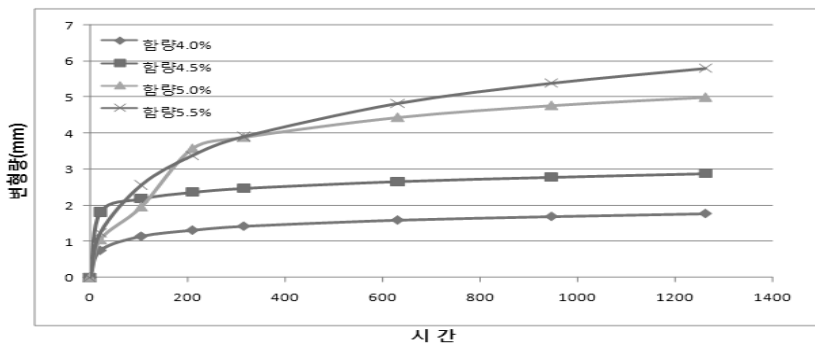


그림 3.6 아스팔트 바인더 함량 인자의 소성변형 시험 결과 - 변형량 곡선

또한 그림 3.7에서 보여 지듯 함량이 4.0%일 때 동적 안정도가 가장 크며 5.5%일 때 가장 낮은 수치를 보인다. 이 결과로 보아 함량이 높을수록 소성변형에 대한 저항에 약하다는 것을 알 수 있다.

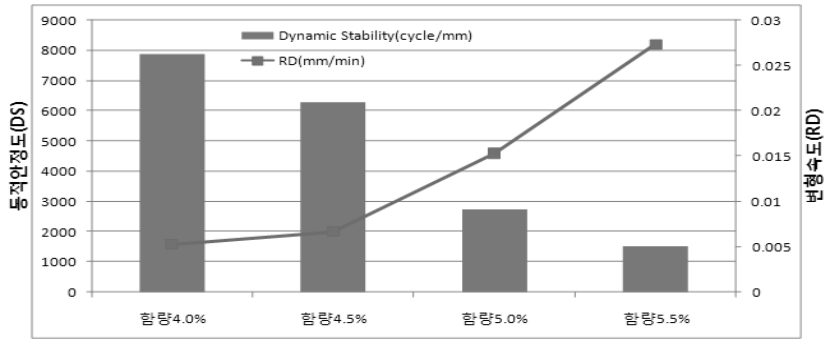


그림 3.7 아스팔트 바인더 함량 인자의 소성변형 시험 결과 - 동적안정도 곡선

(3) 아스팔트 밀도(공극률)에 따른 시험결과

아스팔트 시멘트 포장에서 소성변형의 파괴 현상 중 공극률에 영향을 받는 이유는 크게 밀림에 의한 측방 소성유동(영구변형) 현상과 압밀(Consolidation) 현상으로 나누어 생각할 수 있다. 아래 그림 3.8에서 보여지는 바와 같이 공극률이 1~3%의 경우 시편의 변형량이 다른 조건보다 높다. 이는 측방소성유동에 의한 영향으로 판단되며 시편의 공극률이 적어 시간과 하중이 증가하면 할수록 공극은 없어지고 더 이상 들어갈 공간이 생기지 않아 옆으로 밀려 나온다. 또한 7~9%의 시편의 경우 공극이 너무 크기 때문에 압밀 작용이 발생하여 변형이 생기나 일정 변형이 생긴 후 적정 공극이 생기면서 안정을 찾아가긴 하지만 초기에 발생한 변형은 회복되지 않는다. 그러므로 4~6%의 공극률은 골재의 맞물림 작용과 하중을 하부에 전달하는 과정에서 가장 최적상태로 판단되고 그림 3.9의 경우처럼 동적 안정도 역시 4~6%의 시편이 가장 높은 수치를 보여 공용성에 가장 좋다고 볼 수 있다.

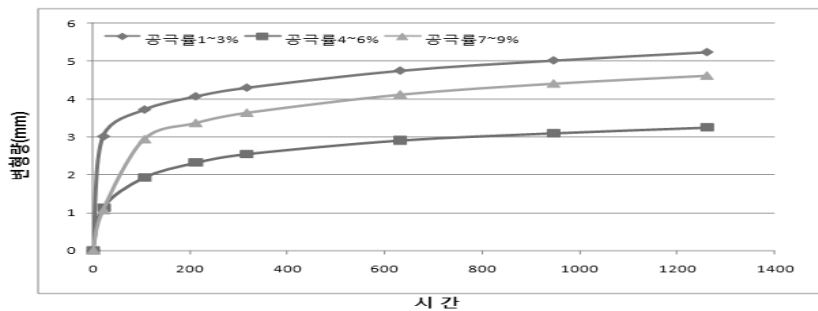


그림 3.8 아스팔트 밀도(공극률) 인자의 소성변형 시험 결과 - 변형량 곡선

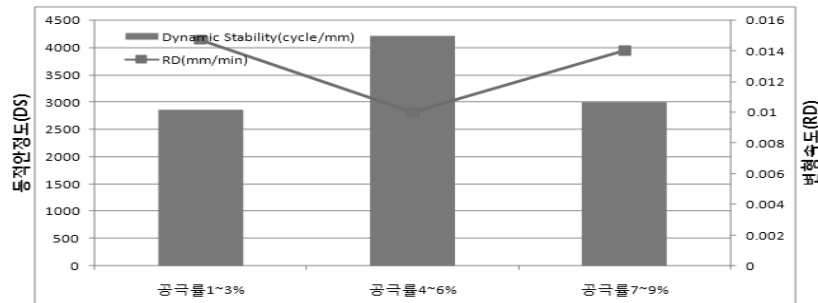


그림 3.9 아스팔트 밀도(공극률) 인자의 소성변형 시험 결과 - 동적안정도 곡선

4. 결론 및 고찰

지불규정 인자에서 공용성에 큰 영향을 미치는 인자인 아스팔트 함량과 밀도(공극률)에 대하여 4점 휨 피로시험을 한 결과 함량의 경우 함량이 낮을수록 시편의 초기강성 값이 높고, 함량이 높을수록 시편의 피로수명 값이 높아지는 경향을 보였으며, 밀도(공극률)의 경우 공극률이 높을수록 시편의 초기강성 값이 작아지고, 공극률 4~6%의 시편에서 피로수명의 값이 가장 크게 나오는 것을 알 수 있다. 소성변형 시험을 한 결과로는 밀도(공극률)의 경우 4~6%때의 공극을 가지는 시편이 동적안정도와 변형률에 대하여 가장 최적 상태의 결과를 보였으며 1~3%, 7~9%때의 공극을 가진 시편은 동적안정도와 변형률에 취약함을 보였다. 또한 아스팔트 함량의 인자에서는 함량이 증가 할수록 혼합물의 측방소성유동 현상이 증가하며 동적안정도에 있어서 위의 그림 3.7과 같이 감소하는 경향이 확인 되었다.

이로써 두 가지 인자에 대한 두 가지 시험을 통하여 각 인자에 대한 공용성의 변화 경향을 확인 할 수 있었으며, 각 인자가 허용 오차범위를 벗어나는 값을 가질 경우 지불규정 적용 시 높은 지불계수를 받을 수 없으며, 도로 포장의 공용성을 보장 할 수 없음을 확인 할 수 있었다.

하지만, 아스팔트 바인더 함량이나 밀도에 대한 지불계수는 100% 이상을 만족하더라도 입도나 기타 요인에 따른 공용성 감소현상이 발생 할 수 있으므로 향후 지불규정 기준인자에 대한 합성 지불계수 산출이 요구된다고 생각된다.

감사의 글

이 논문은 건설교통 R&D 정책·인프라 사업 - 성능중심의 건설기준 표준화과제('06~'11) 연구 결과의 일부입니다. 본 연구의 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 한국건설기술연구원, 한국도로공사, 한국형 포장 설계법 개발과 포장 성능 개선 방안 연구/아스팔트 포장 재료 및 품질 관리 기준 정립, 건설교통부, 2008
2. 한국건설기술연구원, 한국도로공사, 한국형 포장 설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구, 건설교통부, 2004
3. 한국도로교통협회, 아스팔트포장 설계·시공요령, 한국도로교통협회, 1997
4. 한국건설기술연구원, 아스팔트 포장의 현장 다짐관리 매뉴얼, 국토해양부, 2006
5. 최지영, 4점 휨피로시험 장비로 측정된 아스팔트 혼합물의 피로특성에 관한 연구, 한국도로학회 학술대회 논문집, 2005
6. University of California, Berkely, Fatigue Response of Asphalt-Aggregate Mixes, Strategic Highway Research Program, 1994
7. Burati, J. L., Weed, R. M., Hughes C. S., and Hill, H. S. Optimal Procedures for Quality Assurance Specifications. Report FHWA-RD-02-095, Civil Engineering Department of Clemson University, 2003.