

역청콘크리트의 성질과 아스팔트 시멘트 크로마토그램과의 상관관계

Correlation between Property of Bituminous Concrete and Chromatogram of Asphalt Cement Used

o 김 광 우 * 연구석 * 박 제 선 **
Kwang W. Kim Kyu Seok Yeon Je Seon Park

Abstract

Chromatograms of asphalt cements were observed using high pressure - gel permeation chromatography (HP-GPC). The chromatogram characterized profile of molecular size distribution of asphalt cements. Bituminous concretes using the asphalt cements were prepared in laboratory to measure mechanical properties, tensile strength (TS) and resilient modulus (Mr), in dry and wet conditions. Three sources of AC-20 Asphalt cements and one aggregates were used for GPC test and strength test. Results of mechanical property tests and GPC tests were analyzed to evaluate correlation between those two results. Regression analysis showed strong correlation between a mechanical property and sliced percent areas of GPC profile. Mathematical models were developed for estimating mechanical properties of asphalt cement concrete based on HP-GPC data.

1. 서론

1.1. 연구배경 및 목적

아스팔트는 다양한 크기의 분자로 형성되어 있는 Macromolecular 물질로서 그 분자의 분포 형태에 따라 형질에 차이가 있다. 포장용 아스팔트 시멘트(Asphalt Cement: AC)는 原油의 산지에 따라 그리고 精油方法에 따라 形質(Characteristics)상 많은 차이가 있다. 포장용 AC의 形質은 그것으로 제조한 역청 콘크리트 (또는 아스팔트 콘크리트, Asphalt Cement Concrete: ACC)의 성질에 많은 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 따라서 AC의 形質의 차이에 따라 ACC의 性能(Performance)에도 차이가 생기게 된다.

AC의 형질은 폴리머 류의 流性學(Phology)적 분석방법의 하나인 크로마토그램(Chromatogram)을 이용하여 특정지를 수 있다. 이 크로마토그램의 분자입도분포의 분석을 통하여 AC의 물리적 성질을 추정하는 연구가 있어왔다 (1,2,3,4,5). 그리고 그와 유사한 방법으로 ACC의 역학적 성질을 추정하는 연구도 가능한 것으로 시사되고 있지만 아직 그러한 연구는 미흡한 실정이다. 그이유는 아마도 골재의 특성과 ACC 제조 방법에 따른 차이가 또다른 변수로 작용하기 때문인 것으로 추정된다.

따라서 본연구의 목적은 AC에 대한 形質分析과, 그형질과 ACC의 기본적인 力學的 성질과의 관계를 분석하여 크로마토그램의 결과로부터 ACC의 역학적 성질을 추정하는 기초적인 연구를 수행 하는 것이다.

2. 실험개요 및 방법

2.1 실험개요

이 연구의 목적을 달성하기 위하여 아스팔트 시멘트에 대한 크로마토그래프 시험과 물리적 성질, 그로 제조한 ACC의 역학적 성질을 측정하는 것이 필요하다. 각기 다른 회사로부터 구한 3가지 AC를 시료로 사용하였고 ACC의 역학적 성질측정에는 골재로 인한 영향을 배제하기 위하여 같은

종류의 골재를 사용하여 공시체를 제조 하였다. 크로마토그램 시험에는 Waters의 High Pressure Gel Permeation Chromatography (HP-GPC) 기구에 Differential Refract Indexmeter (RI Detector)를 검출기로 사용 하였으며, AC의 물리적 성질 시험으로 絕對粘性, 動粘性 과 侵入度를 측정 하였다. ACC의 역학적 성질로 인장강도(Tensile Strength: TS)와 Resilient Modulus(反動係數: Mr)가 측정 되었다.

2.2. 실험재료

South Carolina주의 3개의 석유회사 정류공장으로 부터 얻어진 3 개의 AC-20 아스팔트 시멘트 (A, E, K 로 命名)를 사용 하였다. 도로표준 ACC 제조용 쇄석골재 (굵은골재 최대치수 1/2") 한가지가 공시체 제조에 사용 되었다. HP-GPC 시험의 Sample 희석과 유동용액(Buffer or Mobil Phase)으로는 HPLC 등급의 TetraHydrofuran (THF)이 사용 되었다.

2.3. AC의 크로마토그래프 시험

HP-GPC 시험에는 3개의 Ultrastayragel Column (500Å 2개, 1000Å 1개)을 사용하여 보다 낮은 Partition을 얻도록 하였다. THF용액의 유동속도는 1ml/min. 였고, THF는 사용전 30분 가량 진공 (30" Hg)펌프로 산소를 제거 하였다. 분석용 AC는 중량비 0.25% (AC:THF=1:400)로 희석 시켰으며 모든 시험의 1회 주입량은 Column의 용량과 Detector의 감도에 맞추어 事前 실험을 통하여 100μl로 정하였다. 분석용 Sample 은 주입 몇분 전 0.5μm filter로 걸러 이물질의 반입을 막도록 하였다. 실험시 온도와 Column의 온도는 25°C로 유지하도록 하였다. 1회 시험은 총 40분 걸렸으며 주입후 약 15분 후부터 Elution이 일어나기 시작하여 약30분 정도에 끝났다 (Figure 1). 각 Sample은 4회 반복하여 실험 하였다.

2.4. AC의 물리적 성질 시험

AC의 대표적인 물리적 성질로 絕對粘性, 動粘性, 侵入度를 ASTM D2170, D2171, D5 (7) 에 의하여 각기 측정 하였다. 각 성질의 시험온도는 결

* 正會員, 江原大學校 農工學科
** 正會員, 江原大學校 土木工學科

대점성이 60°C, 동점성은 135°C 그리고 침입도는 25°C 였다. 각 시험은 각 아스팔트 시멘트에 대하여 4회 반복 실시 하였으며 그 평균값들은 Table 1 에 주어졌 것과 같다.

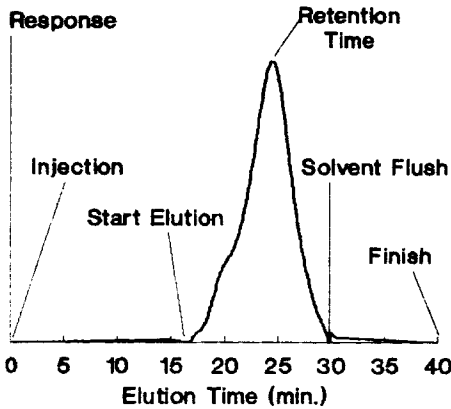


Figure 1. Illustration of A Typical HP-GPC Curve.

Table 1. Mean Value of Physical Properties of 3 AC-20 Asphalt Cements.

ASP	Physical Properties		
	Absolute Viscosity (poise)	Kinematic Viscosity (centistoke)	Penetration (0.01mm)
A	1067	415.0	84.4
E	2301	416.0	60.3
K	2287	434.5	81.7

2.5. ACC 역학적 성질시험

각 AC에 대하여 균일한 마찰 공시체를 24개씩 제조 하였다. 공시체는 Asphalt Institute 의 MS-2 (8)에 의거하여 제조 하였으며 제조시 다짐 횟수는 1면당 50회로 하였다.

ACC의 강도는 건조상태와 습윤상태에서 많은 차이가 있으므로 강도측정은 건조된 공시체와 포화시킨 공시체 두가지에 대하여 실시하였다. 이를 위하여 공시체들은 제조후 3시간 이상 25°C 실내에서 식힌뒤 건조상태와 습윤상태 측정용으로 12개씩 임의로 나누었다. 습윤상태 측정용 공시체들은 선별후 물에 담구어 5분간 30" Hg 진공을 가한후 60°C의 물에 24시간 침전후 꺼내어 5분내에 SSD상태에서 필요한 측정을 하였고, 건조상태의 공시체는 선별후 바로 측정에 사용 되었다. 따라서 총72개의 공시체 (3 AC x 2 강도 x 2 수분 조건 x 6 반복 = 72)가 제조 및 시험 되었다.

ACC의 중요성질중의 하나인 인장강도는 간접인장 시험에 의하여 그리고 Resilient Modulus는 차량의 시속 100km/h의 주행속도를 Simulation한 상태에서 반복하중으로 ASTM D4123 (7)에 의하여 측정되었다. 각각의 Treatment 당 8개의 공시체에 대하여 측정된 시험치중 최대치와 최소치를 제거한 4개의 값들을 분석에 사용하였고 그 평균치는 Table 2 과 같다.

Table 2. Mean Values of Mechanical Properties of 3 Asphalt Cement Concretes.

ASP	Tensile Strength			Resilient Modulus		
	Dry (psi)	Wet (psi)	TSR ¹ (%)	Dry (psi)	Wet (psi)	MR ² (%)
A	117.5	75.4	64.6	256.7	233.2	91.8
E	122.0	72.5	58.7	331.5	171.2	53.1
K	101.8	63.0	61.9	223.4	181.9	81.4

1. $TSR = (Dry\ TS) / (Wet\ TS) \times 100$

2. $MR = (Dry\ MR) / (Wet\ MR) \times 100$

3. 실험결과 및 분석

3.1. HP-GPC 결과

각 AC에 대한 4회 반복 GPC시험으로부터 얻어진 분자입도분포 (Molecular Size Distribution: MSD)는 Figure 2와 같다. AC에 대한 GPC곡선은 성질상 Polymer와 같이 곡선의 앞부분은 입자가 큰 분자들이 나오는 것을 나타내며 시간이 지나면서 차례로 입자가 작은 분자들이 뒷부분에 나옴을 나타낸다. 그리고 곡선상의 분자의 위치별로 AC의 특정 형질을 나타내므로 분자입도분포도의 형태에 따라 그 AC의 고유의 성질을 나타낸다.

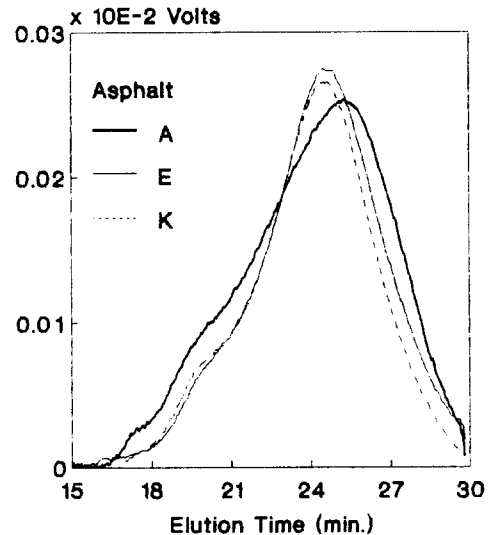


Figure 2. Illustration of HP-GPC Profiles for 3 Asphalt Cements

이곡선들을 분석하기 위하여 GPC곡선상 Sample 이 Elute된 시간 약 15분 부터 30분 까지를 같은 시간대로 Figure 3 과 같이 10등분으로 나누어 첫 번째 부터 10번째 까지를 T1 부터 T10 로命名 하였다. 각 구간별로 구한 4반복 면적비율의 평균치는 Table 3 과 같다. 일반적으로 T1-T4구간의 분자를 대형입도 분자 (Large Size Molecular: LSM)로, T5-T7 을 중간입도 분자 (Medium Size Molecular: MSM), T8-T10 를 소형입도 분자 (Small Sized Molecular: SSM) 로 칭한다. 각 면적(분자량)의 전체면적에 대한 比率를 구하였으며, 각 AC 의 분할면적비율 Figure 4 에서 보여주고 있다.

Figure 4와 Table 3 에서 보여주듯이, AC A는

대체로 SSM (T8-T0)이 他AC보다 많고, K는 LSM 와 MSM (T1-T6)이 他AC보다 많았으며 E는 MSM중 T7 이 가장 많고 T1, T2, T0에서 가장 적은 반면 他 입자는 3종중 대략 중간을 차지 하였다. 이로부터 A와 K가 앞뒤 부분의 본자임도 본포가 크게 다른 반면 E는 그 중간 정도임을 알 수 있었다.

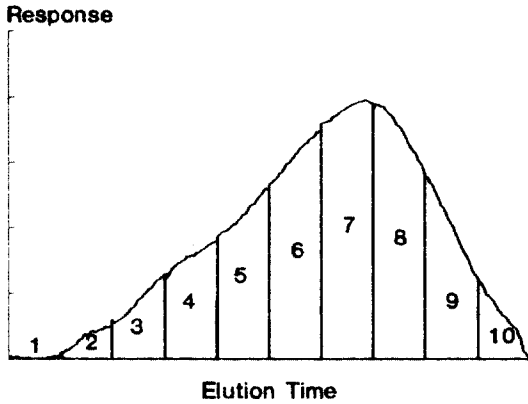


Figure 3. Description of Slice of A HP-GPC Curve into 10 Equal Time.

Table 3. Mean Value of % Area for Each Slice of HP-GPC Curves.

SLICE NAME	ASP					
	A		E		K	
	MEAN	STD	MEAN	STD	MEAN	STD
T1	0.58	0.13	0.39	0.10	0.57	0.13
T2	2.19	0.29	1.93	0.18	2.61	0.39
T3	5.39	0.34	5.48	0.29	6.08	0.63
T4	8.39	0.43	8.81	0.50	9.13	0.21
T5	12.69	0.29	14.42	0.55	14.95	0.59
T6	17.71	0.31	21.99	0.28	22.28	0.64
T7	20.89	0.35	22.78	0.40	23.98	0.54
T8	17.95	0.36	14.82	0.55	13.50	0.68
T9	10.39	0.41	7.13	0.63	6.49	0.30
T0	3.82	0.91	2.26	0.66	2.41	0.38

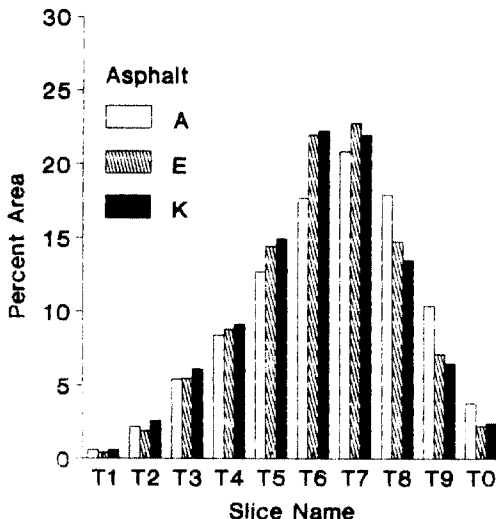


Figure 4. Comparison of % Area for 10 Slice among Three Asphalt Cements.

3.2. ACC의 역학적 성질

아스팔트 콘크리트의 인장강도와 반동계수를 측정 한 결과는 Table 2 와 같다. 일반적으로 별 다른 첨가제 없는 경우 ACC의 강도는 습윤상태에서 크게 저하되는 것으로 알려져 있으며 이 실험의 결과에서도 그 유지비(TSR, MrR)가 매우 낮았다. 특히 TSR (습윤인장강도/건조인장강도 × 100) 값은 모든 AC에 대하여 60% 내외정도 였다. 또한 시험결과에 의하면 아스팔트 시멘트 E가 인장강도와 반동계수에서 최대, K가 중간 그리고 A가 최하였으며 TSR과 MrR (습윤반동계수/건조반동계수 × 100) 에서는 정 반대의 경향을 보였다.

3.3. GPC 결과와 역학적 성질과의 比較考察

위의 역학적 성질분석 결과는 GPC 분할면적비와 어떤 관계가 있음을 알 수 있게 해준다. 건조인장강도와 반동계수가 가장 높고 이들의 維持比가 가장 낮은 AC E 가 GPC 분할면적의 MSM 부분인 T7이 가장 높았고, 아주 큰 입자들 (T1-T2)과 아주 작은 입자 (T0)에서 가장 낮았다. (TSR=58.7, MrR=53.1). 강도가 중간이고 강도유지비가 가장 높은 AC A의 경우 T3-T6 에서 가장 낮고 SSM 부분에서는 가장 높았다. 반면 강도가 중간인 AC K의 경우 전반부 (T1-T6)가 가장 높고 후반부 (T0 제외)는 가장 낮았다. 그리고 뒷부분의 작은입자들 (T8, T9, T0) 의 비율이 가장 높은 AC A는 습윤상태에서 두 성질다 높은값을 보이고 있다. 이러한 결과들은 PC Profile의 부분적 분할면적비가 그 AC로 제조된 ACC 강도치들과 조화를 이루는 어떤 적정 범위가 있음을 시사한다.

T8, T9, T0 부분의 비율이 가장 높은 AC A가 습윤상태에서 특히 높은 Resilient Modulus 값을 보이고 있어 그부분의 본자가 습윤상태의 Mr증진에 결정적인 역할을 하는것 같다. 또한 LSM 부분 (T1, T2, T3, T4) 과 MSM 부분중 앞부분인 (T5, T6) 비율이 가장 높은 K가 모든강도에서 최소인 것을보면 이부분이 너무 비율이 과다하면 강도의 저하가 일어나는 것으로 보여진다.

4. GPC 결과와 역학적 성질 간의 相關分析

4.1. 회귀분석

GPC 분할면적비와 역학적 성질과의 관계를 SAS(Statistical Analysis System)의 STEPWISE Procedure (9)의 회귀분석 방법을 이용하여 조사 하였다. 10개의 분할면적을 독립변수로, 각 성질을 종속변수로 하는 모델을 이용한 多元回歸分析 (Multiple Regression)을 수행 하였다. 주어진 역학적 성질을 분할 면적으로 부터 가장 적절히 추정할수 있는 모델(최대 相關比, r²,를 나타내는 모델)을 STEPWISE 결과로부터 구하였다. 각 모델에서 유의차 수준(α)은 0.20 (SAS에서 0.1-0.25 로 추천)로 그리고 최소 r²는 0.75로 설정 하였다. 따라서 본연구의 모델은 F-값으로 측정된 確率이 0.20 이하 그리고 相關比가 0.75 이상인 것 만이 추정모델로 고려 되었다.

4.2. 역학적 성질의 추정

분석에 사용된 모델은 건조상태와 습윤상태의 인장강도와 반동계수로 총 4개 있다. Table 4는

STEPWISE로 부터 주어진 10개면적비중 선정된 각 성질에 대한 최적모델과 그때의 r^2 그리고 確率치를 보여주고 있다. 4개모델 모두 강한 상관관계가 있음을 보여주고 있다.

多元回歸分析 으로부터 선정된 각 모델의 변수에 대한 계수도 계산 되었다. 각 성질에 대하여 Table 4에 주어진 최적모델들에 이 계수들을 대입한 回歸方程式은 아래식 1 - 4와 같다.

Table 4. STEPWISE Results for Mechanical Property

Property		Model	r^2	Pr.> F
TS	Dry	DTS=T ₁ , T ₃ , T ₄ , T ₅ , T ₆ , T ₇ , T ₈ , T ₉	0.8987	0.1757
	Wet	WTS=T ₁ , T ₅ , T ₆ , T ₇ , T ₈ , T ₉	0.9441	0.0001
MR	Dry	DMR=T ₁ , T ₂ , T ₃ , T ₄ , T ₅ , T ₉ , T ₀	0.9966	0.0001
	Wet	WMR=T ₁ , T ₂ , T ₃ , T ₅ , T ₇ , T ₉ , T ₀	0.9841	0.0019

Note: TS = Tensile Strength
MR = Resilient Modulus

$$DTS = 159.3T_1 + 139.6T_3 - 80.8T_4 + 257.1T_5 - 69.6T_6 + 229.7T_7 - 101.4T_8 + 259.6T_9 - 7754.9 \quad (1)$$

$$WTS = 82.6T_1 - 20.9T_5 + 21.5T_6 - 24.8T_7 + 58.4T_8 - 60.4T_9 \quad (2)$$

$$DMR = 97.5T_1 - 310.1T_2 + 308.8T_3 - 343T_4 + 189.5T_5 + 110.6T_9 - 111.9T_0 - 1048.7 \quad (3)$$

$$WMR = 789.5T_1 - 582.1T_2 + 91.8T_3 - 56.6T_5 - 177.5T_7 - 140.1T_9 + 68.2T_0 + 6186.6 \quad (4)$$

여기서, DTS 는 건조 인장강도
WTS 는 습윤 인장강도
DMR 는 건조 반동계수
WMR 는 습윤 반동계수 이다.

4가지 무델중 WTS는 보다많은 상관비를 얻기 위하여 모델에 Intercept (절편)를 없이하여 구하였다 (식2). 실험으로 얻어진 Data와 위 식들로부터 계산 되어진 추정치들을 각각 X축과 Y축으로 하여 그린 그림이 Figure 5 부터 Figure 8 까지 보여지고 있다. 그림에서 보여 주듯이 건조반동계수는 거의 완전예 가까운 상관관계 ($r^2=1$)를 보여주고 있고 나머지도 상관비가 0.9내지는 그 이상을 보여주고 있어 매우강한 상관관계가 있음을 알수있다.

4.3. 분석 및 고찰

Table 4 에서 보여주듯이 가장 큰입자인 T₁, MSM의 T₅ 그리고 SSM의 T₉은 4가지 모델에 모두 포함 되어있다. 이는 이 세부분이 위의 성질을 결정하는데 있어서 중요한 변수임을 말해준다. 인장강도의 경우 건조상태나 습윤상태나 공히 T₁, T₅, T₆, T₇, T₈, T₉가 모두 포함되어 있는 반면, 반동계수에는 T₁, T₂, T₃, T₉ T₀이 모두 포함되어 있어 두 성질에 차이를 이것을 통하여 보여준다.

특히 T₆와 T₈은 MR에는 없이 TS에만, 그리고 T₂와 T₀는 TS에는 없이 MR 있어 T₆와 T₈부분의 본자형질은 인장강도 결정에 중요한 변수로, 그리고 T₂와 T₀ 부분의 본자형질은 반동계수 결정에 중요한 변수로 작용함을 알수있다.

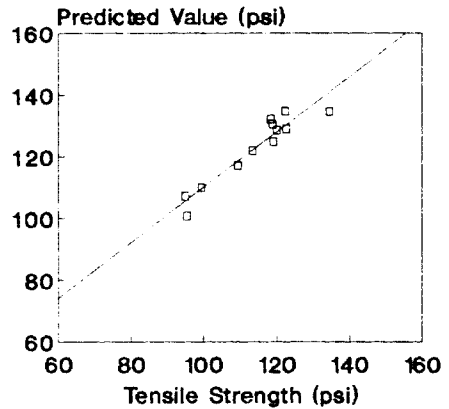


Figure 5. Dry Tensile Strength Vs. Linear Prediction by Equ. 1, $r^2 = 0.8997$

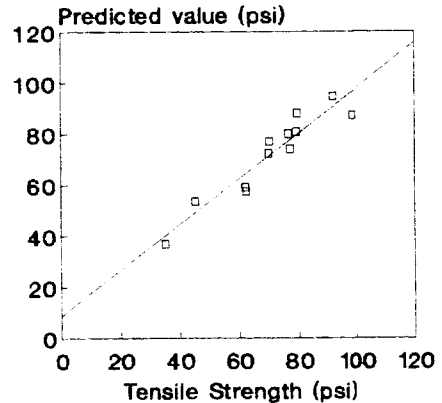


Figure 6. Wet Tensile Strength Vs. Linear Prediction by Equ. 2, $r^2 = 0.9441$

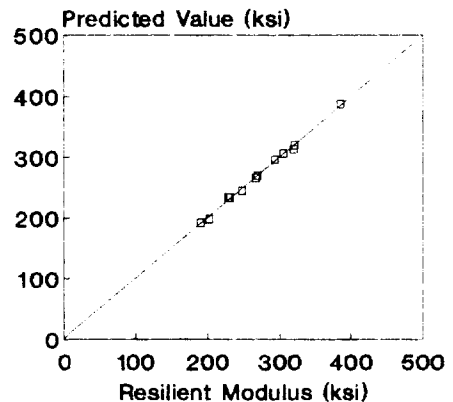


Figure 7. Dry Resilient Modulus Vs. Linear Prediction by Equ. 3, $r^2 = 0.9966$

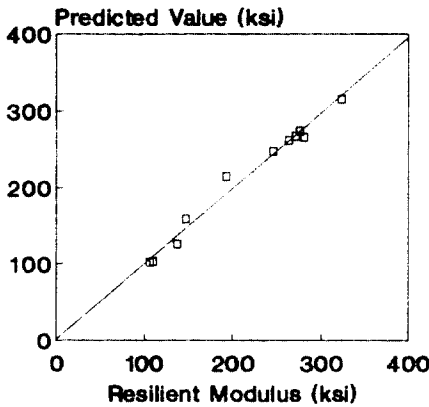


Figure 8. Wet Resilient Modulus Vs. Linear Prediction by Equ. 4, $r^2 = 0.9841$

건조상태에서는 두가지 성질 모두에 T4가 중요한 변수이나 습윤상태에서는 제외 되었다. 습윤 상태에서 아스팔트 콘크리트의 강도저하는 골재표면에 부착되어 막을 형성하고 있는 아스팔트 시멘트의 부착력이 습기로 인하여 저하되기 때문이다. 이런점을 고려 한다면 T4부분의 본자가 골재가와의 부착력에 어떤 관계를 가지는 형질을 지닌 부분임을 추측케 하여준다.

AC의 물리적 성질들과 분할면적과의 상관분석도 수행 하였다. 이는 이미 알려진 바와 같이 (3,6,10) 양호한 상관관계를 보여주고 있으므로 본 논문에서는 그 값을 기술치 않았다. 또한 AC의 물리적 성질과 ACC의 역학적 성질과의 상관관계를 보기 위하여 각 역학적 성질에 대하여 3가지 물리적 성질을 독립변수로 같은방식의 다원 회귀 분석을 수행 하였으나 상관관계를 구하는데 실패 하였다. 즉 각각에 대하여 구할 수 있는 최적 모델의 상관비는 모두 0.5 이하로 낮아서 AC의 물리적 성질과 그로 제조한 ACC와의 직접적인 관계는 불투명 함을 보여 주었다.

5. 결론

아스팔트 시멘트(AC)의 분자 입도분포 특성 (Chromatogram)과 그 AC로 제조한 역청 콘크리트 (또는 아스팔트 콘크리트: ACC)의 역학적 성질을 비교검토한 결과 아스팔트 콘크리트의 성질은 아스팔트 시멘트의 분자입도분포의 형태와 밀접한 상관 관계가 있음을 알 수 있었다. 본 연구에 사용된 역학적 성질은 인장강도와 Resilient Modulus (반동계수)이며 이들은 선형 다원회귀분석을 통하여 Chromatogram상의 분할면적비 값들의 함수로 나타내어 질 수 있었다. 이때 각 성질과 Chromatogram과의 상관비 (r^2)는 모두 거의 0.9내지 그 이상 1에 가까웠다. 이는 건설재료로써의 AC 및 골재 자체에 내재해 있는 불확실성을 감안 한다면 대단히 높은 수치이다. 또한 이 관계는 아스팔트 콘크리트가 수분으로 포화된 상태에서 별 차이가 없었다. 특히 분자 입도가 가장 큰부분인 T1, 중간부분의 T5 그리고 아주 작은 입자인 T9은 수분 상태와 관계없이 인장강도와 반

동계수를 결정하는데 중요한 변수임을 알 수 있었다.

본 연구에서는 ACC성질에 골재의 차이에 의한 변동량을 배제하기 위하여 한종류의 골재를 선별 하였으며, 각 공시체마다 같은 입도가 되도록 하여 공시체를 제조 하였다. 하지만 이런 방법은 소량 실험시의 실험실 통제하에서만 가능하며 실제 현장에서는 불가능 할것이다. 또한 아스팔트 콘크리트의 역학적 성질은 사용된 골재의 특성과도 관련이 있다. 따라서 본 연구에서의 결과는 사용된 골재가 가지는 어떤 특성에 기인하는지도 모른다. 그러므로 여러종류의 골재를 사용하여 현장조건 하에서 이와같은 연구를 실시할 경우 보다 일반화된 관계를 얻어 낼 수 있을 것으로 사료 된다. 또한 본연구에서 사용되지 않은 ACC의 성질, 예를들어 마찰 안전강도 또는 압축강도, 등에 대한 같은방식의 연구도 값어치 있는 연구가 될것이다.

이와같은 연구로 부터 얻어진 결과는 AC분자분포가 역학적 성질에 어떻게 영향을 미치는 지를 보여 주므로 AC의 선별을 위해 사용 될 수 있다. 또한 Polymer등의 첨가제를 사용한 AC의 형질개선 연구의 기초자료로 사용될 수 있을 것이다.

참고문헌

- Jennings, P.W., "High Pressure Liquid Chromatography as a method of Measuring Asphalt Composition," Report # FHWA-MT-7930, Dept. of Chemistry, Montana State University, Bozeman, Montana, March 1990.
- Bynum, D. and Traxler, R., "Gel Permeation Chromatography Data on Asphalts Before and After Service in Pavement," Proceedings of Association of Asphalt Paving Technologist, Volume 39, 1970.
- Kim, K.W. and Burati, J.L., "Characterization of Asphalt Cement Properties Using Chromatogram," Submitted to AAPT for Publication in Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, Volume 59, 1990.
- Goodrich, J.L., Goodrich, J.E., and Kari, W.J., "Asphalt Composition Tests: Their Application and Relationship to Field Performance," Presented at 65th Annual Meeting of Transportation Research Board Meeting, January 1986.
- Plummer, M.A., and Zimmerman, C.C., "Asphalt Quality and Yield Prediction from Crude Oil Analysis," Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, Volume 53, 1984.

6. Jennings, P.W., et al, "Uses of High Performance Gel Permeation Chromatography for Asphalt Analysis," Presented at 64th Annual Meeting of Transportation Research Board Meeting, January 1985.
7. Annual Book of ASTM Standards, Section 4, Construction, Volume 4.03 Road and Paving Material; Traveled Surface Characteristics, Easton, MD, 1988.
8. The Asphalt Institute, Mix Design Methods for Asphalt Concrete, Manual Series No. 2, 1984.
9. SAS User's Guide: Statistics, Version 5 Edition, SAS Institute Inc., Cary, NC, 1987.
10. Price, R.P. "A Quantitative Method to Characterize Asphalts Using High Pressure Gel Permeation Chromatography," Dissertation for Ph.D, Department of Civil Engineering, Clemson University, Clemson, SC, August 1988.