

# 골재 종류에 따른 아스팔트 혼합물의 고온 거동 특성

황 성 도\* · 안 신 환\*

## 1. 머리말

1990년대 이후 중차량 교통의 급증과 여름철 이상 고온 현상의 지속으로 국내의 아스팔트 포장층은 소성변형 또는 각종 균열 등의 파손이 발생되면서 예정된 설계 수명을 다하지 못하고 덧씌우기 등의 잦은 보수 공사가 시행되고 있다. 이러한 아스팔트 포장의 조기 파손에 대한 주요 원인은 과적 차량 및 이상 기온과 같은 외부 환경 요인, 포장 재료의 선정 및 배합 등과 같은 재료 요인, 그리고 부적절한 포설 온도 관리 및 다짐 등을 포함한 시공 요인등 세 가지로 크게 나눌 수 있다. 이 세 가지 요인 중, 재료 요인을 살펴보면, 포장 재료별 물성이 각종 도로 시방서에 규정되어 있고, 포장 공사는 이러한 규정에 따라 아스팔트 혼합물의 설계 및 포설이 이루어지고 있다. 그러나, 이러한 물성 규정이 우리나라의 환경 여건에 적합한지에 대한 여부를 검증하지 않은 채 사용함으로써, 상기와 같은 다양한 포장 파손을 발생시키는 원인이 되고 있다.

특히 최근 몇 년간의 건설 물량의 증가에 의해 야기된 골재 자원의 고갈 현상으로 건설 분야에서는 포장 골재의 양적 확보가 시급한 과제로 부각되었다. 이러한 요구에 따라 전국적으로 무분별한 골재 석산의 개발이 진행되었고, 다양한 암석 종류의 골재를 사용하게 되었다. 이는 아스팔트

혼합물의 약 90%의 용적비를 차지하는 골재의 품질에 변화를 초래함으로써, 아스팔트 포장의 강도와 내구성에 영향을 미치는 큰 요인이 되었다.

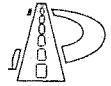
본 보고서는 골재의 암석 종류에 따라 아스팔트 혼합물의 품질 변화에 미치는 영향 등을 파악할 목적으로, 국내·외 관련 문헌들을 조사하였고 3종의 다른 암석으로 생산된 골재를 사용한 아스팔트 혼합물의 휠트래킹 시험 결과를 분석하였다. 이를 통해 골재의 암석 종류에 따른 아스팔트 혼합물의 고온 거동 특성에 대하여 살펴보았다.

## 2. 골재의 암석학적 특성

아스팔트 혼합물은 아스팔트와 골재로 구성된 포장 재료이다. 아스팔트는 골재 입자들을 결합시키는 결합재의 역할과 혼합물 내에 물의 침투를 방지하는 방수재의 역할을 한다. 그리고 골재는 아스팔트로 결속되어 포장 구조물의 강성과 강도를 주는 골격으로서 중요한 역할을 한다.<sup>3)</sup>

이러한 아스팔트 혼합물을 구성하는 골재의 품질은 입형(형상), 입도, 풍화 정도 등의 생산 공정에 의한 특성에 큰 영향을 받으나, 골재의 마모율이나 강도는 골재의 원암석의 특성에 의해 결정된다. 여기에서는 골재의 암석학적 분류와 화학적 특성에 대해 개략적으로 살펴보았다.

\* 한국건설기술연구원 연구원



## 2.1 골재의 암석학적 분류

도로 포장용으로 사용되는 골재의 암석은 일반적으로 지질학적 생성 과정과 주요 조암 광물들의 종류, 크기, 배열 상태 등에 따라 분류된다.4)

일반적으로 아스팔트 혼합물에 사용되는 골재로는 천연암(natural rock)으로부터 공급되는 천연 골재(natural aggregate) 및 처리된 골재(processed aggregate)가 있으며, 이 외에 일부 사용되는 골재로는 점토를 고온에서 가열하여 생산한 경량 골재와 제철 과정의 부산물로 생산된 슬래그 등의 인공 골재가 있다.4) 이 중에서 도로 건설용 골재로 가장 폭넓게 사용되는 천연암은 암석을 분류하는 방법 중에서 일반적으로 사용되는 지질학적 생성 과정에 따라 크게 화성암(igneous rock), 퇴적암(sedimentary rock), 변성암(metamorphic rock)등 3종으로 구분할 수 있다.6)

국내의 아스팔트 혼합물에 많이 사용되고 있는 굵은 골재는 주로 천연 골재와 처리된 골재가 사용되고 있으며, 이 중에서 천연 골재는 강이나 퇴적 침전물에서 채굴하여 비교적 풍화에 강한 다양한 종류의 암석으로 구성되어 있는 하천 골재

가 해당되고, 처리된 골재는 암석을 파쇄하여 생산된 것으로 단일 또는 수종의 암석으로 이루어진 쇄석 골재가 해당된다.

골재 자원 부존 조사 보고서에 의하면, 국내의 쇄석 골재로 사용되는 암석의 종류로는 화성암(화강암, 화강 섬록암, 규장반암, 규장암, 조면암, 안산암)과 퇴적암(역암, 사암, 미사암, 셰일, 이암, 규질암, 화산 각력암, 응회암) 및 변성암(편마암, 편암, 규암, 혼온펠스)에 이르기까지 다양한 것으로 나타났다.4) 이 중에서 경기도 지역에서 아스팔트 혼합물용 쇄석 골재로 많이 사용되는 암석으로는 화강암, 호상편마암, 규암, 안산암의 순으로 파악되었다.

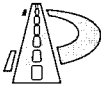
표 1은 아스팔트 혼합물용 골재로 사용되는 천연 골재의 각 암석별 특성을 분류한 것이다.

## 2.2 골재의 화학적 특성

아스팔트 혼합물에서 골재는 아스팔트와의 접촉에 의해 결합되는 재료로서 골재의 화학적 특성이 골재의 품질 적합성과 성능에 영향을 미친다. 아스팔트는 골재의 표면을 피복하고 골재 사이를 결합시키며, 아스팔트 혼합물이 물에 접촉했

표 1. 천연 골재의 암석별 공학적 특성 <sup>6)</sup>

암석 종류		강도	내구성	안정성	표면 특성
화성암	화강암, 섬장암, 섬록암	우수	우수	우수	우수
	규장석	우수	우수	보통	보통
	현무암, 휘록암, 반려암	우수	우수	우수	우수
	페리오도타이트	우수	보통	우수	우수
퇴적암	석회암, 백운암	우수	보통	우수	우수
	사암	보통	보통	우수	우수
	규질암	우수	불량	불량	보통
	역암, 각력암	보통	보통	우수	우수
	혈암	불량	불량	불량	우수
변성암	편마암	우수	우수	우수	우수
	규암	우수	우수	우수	우수
	대리석	보통	우수	우수	우수
	서펜티나이트	보통	보통	우수	보통
	엠펜보라이트	우수	우수	우수	우수
	점판암	우수	우수	우수	불량



을 경우, 박리 현상에 저항해야 한다. 따라서 아스팔트와 결합하는 골재의 표면의 화학적 특성은 아스팔트 혼합물의 성능을 좌우하는 중요한 역할을 한다. 아스팔트 혼합물에서 아스팔트와 골재의 접착성과 아스팔트 막의 박리는 여러 요소간의 물리·화학적 상호 작용에 관련된 복잡한 현상이다.6) 골재의 광물학적 성질과 화학적 조성이 아스팔트·혼합물의 박리 저항성에 영향을 미치는 중요한 요소인 것으로 알려져 있다.

골재는 아스팔트와의 결합 정도에 따라 친수성 골재와 소수성 골재로 나뉘지는데, 친수성 골재는 물의 영향에 민감한 특성을 가지고 있으며, 소수성 골재는 아스팔트와의 접착력이 우수하여 박리 및 수분 손상에 대한 저항성이 우수한 것으로 알려져 있다.4)

### 3. 골재의 물성 특성

골재는 아스팔트 혼합물의 약 90%의 용적비를 차지하고 있어, 골재의 품질에 따라 포장의 강도나 내구성 등에 미치는 영향은 크다. 따라서 최적의 아스팔트 혼합물을 제조하기 위해서는 사용되는 골재의 암석 종류와 물리적 특성 등을 충분히 조사하여 양질의 골재를 선정해야 한다.3) 한국수자원공사의 보고서에 따르면, 아스팔트 혼합물용 골재로서 다음의 성질이 요구된다고 하였다.1)

- 아스팔트와의 친화성이 있을 것

- 입형이 입방체에 가깝고, 모난 각이 많을 것
- 암질이 견고하여 내화성과 내마모성이 좋을 것
- 표면이 거칠고, 불순물 등에 오염되지 않을 것
- 비중이 크고, 흡수율이 작을 것
- 동결·융해 작용에 대한 저항성이 양호할 것
- 규암 및 연암을 규정값 이상 함유하지 않을 것

골재의 품질은 포장의 공용성에 큰 영향을 미치는 요소로서, 골재의 산지에 따라 각기 다른 물성 특성을 가지고 있어, 각 국가는 소요 품질의 포장을 확보하기 위해 골재의 표준 규격을 정하고 있다.

표 2, 표 3, 표 4, 표 5, 표 6은 국내·외의 표층용 아스팔트 혼합물의 골재 품질 기준을 분류한 것이다.

\* 4.75mm체에 남는 골재를 대상으로 세장석편은 폭에 비하여 길이가 3배 이상인 것, 편평석편은 두께에 대한 폭의 비가 3배 이상인 것.

표 3. 표층용 아스팔트 혼합물의 골재 품질 기준(미국 일리노이주)<sup>10)</sup>

품질 시험	기준
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 안정성 5 Cycle (최대 손실, %)	25 이하
Los Angeles 마모시험 (최대 손실, %)	40 이하
소성 지수 (%)	2 ~ 9

표 2. 표층용 아스팔트 혼합물의 굵은 골재 품질 기준(한국)<sup>2),5)</sup>

구 분	시험 방법	건설교통부	한국도로공사
비 중(표면 건조)	KS F 2503	2.45 이상	2.5 이상
흡 수 량(%)	KS F 2503	3.0 이하	3.0 이하
마 모 감량(%)	KS F 2508	35 이하	35 이하
안정성 시험 감량(%)	KS F 2507	12 이하	12 이하
아스팔트피막박리시험에 의한			
피복면적(%)	KS F 2355	95 이상	95 이상
편평 및 세장편 함유량(%)	*	20 이하	20 이하

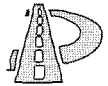


표 4. 표층용 아스팔트 혼합물의 골재 품질 기준(미국 버지니아주)<sup>8)</sup>

품질 시험	기 준
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 안정성 5 Cycle (최대 손실, %)	15
동결융해 안정성 20 Cycle (최대 손실, %)	6
No.200 체 통과 씻기 손실률 (최대, %)	3 <sup>1)</sup> , 5
Shale, 운모, coated grains, 부드러운 박편 입자(최대, %)	1.0
점토 함량 (최대, %)	0.25
유기물 함량 (최대, %)	0

1) 마모를 많이 받는 경우 사용

표 5. 표층용 아스팔트 혼합물의 골재 품질 기준 (미국 일리노이주)<sup>10)</sup>

구 분	기 준	시 험 방 법
마 모 감 량 (%)	60 이하(파쇄석, 자갈)	AASHTO 96
	45 이하(슬래그)	AASHTO 96

표 6. 단입도 쇄석 및 파쇄석의 품질 기준(일본)<sup>7)</sup>

종류	비중	흡수율(%)	마모감량(%)
단입도 쇄석	2.45이하	3.0이하	35이하
파쇄석	-	-	40이하

이러한 각 국가별 골재의 품질 기준 사이의 차이점은 다음과 같다.

- 국내의 골재 품질 기준은 다른 외국의 기준과 비교하여 규정 항목수와 기준치의 규제가 매우 엄격한 편이다. 특히 마모 감량의 경우, 미국의 다른 주보다 높은 제한치를 두고 있는 것으로 나타났다.
- 미국의 대부분의 주에서는 품질 기준으로 마모 감량을 기준으로 두고 있었으며, 버지니아주만이 4개의 기준 항목을 가지고 있었다.

#### 4. 아스팔트 혼합물에서 골재의 거동

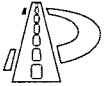
아스팔트 혼합물에서 골재의 품질은 아스팔트 포장의 공용성에 많은 영향을 미치는 요소이다. 특히 아스팔트 혼합물에 사용되는 굵은 골재는 아스팔트 혼합물의 강성과 강도 및 소성 변형 저항성 등의 특성에 큰 영향을 미치는 재료로서, 굵은 골재의 품질이 아스팔트 혼합물의 거동 특성을 크게 좌우할 수 있다.

골재는 표면 조직에 의한 부착력이 약하기 때문에, 골재군의 전단 강도는 주로 골재 사이의 내부 마찰력이나 이동(movement)에 대한 저항력에 좌우된다. 즉, 입방체의 거친 표면 조직을 갖고 있는 골재가 둥글고 부드러운 표면 조직을 가진 골재보다 더 큰 전단 저항력을 갖는다. 하중이 재하되면 그 재하응력이 골재 입자들을 서로 단단하게 결속시켜 주는 작용을 하여 골재의 전단 강도를 증가시켜 주기 때문에 골재군을 더욱 강하게 만드는 경향이 있다. 비록 입방체 형태의 골재와 둥근 형태의 골재가 동일한 값의 강도를 갖고 있다 할지라도 둥근 형태의 골재들보다 입방체 형태의 골재 입자들의 결속력이 더 좋기 때문에 혼합물의 강도를 더 증가시킨다.

국내·외의 지방 기준에서는 최적의 공용 성능을 가진 아스팔트 혼합물을 생산하는데 적합한 골재를 확보하기 위한 품질 관리 방법으로 골재의 내부 마찰력을 강화시킬 수 있는 골재의 물성을 규정하고 있다. 이것은 혼합물용 골재 중에서 조골재들의 파쇄면의 정도를 특정한 값으로 제한함으로써, 규제하고 있다. 또한 아스팔트 혼합물의 골재 입도의 합성에서 천연 모래의 양을 종종 제한하기도 하는데, 이것은 천연 모래가 둥글며 내부 마찰력이 약한 경향이 있기 때문이다.

#### 5. 시험 재료

본 시험에 사용된 아스팔트는 국내에서 널리



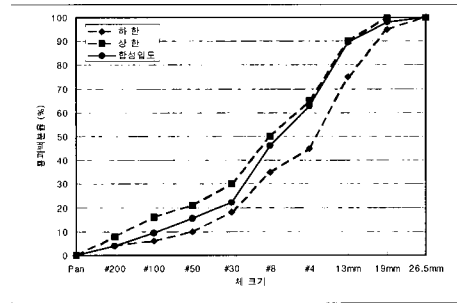
사용되고 있는 침입도 85-100 (AP-3) 등급의 아스팔트이다. 또한 아스팔트 혼합물용 골재로는 국내 골재용 석산에서 생산되는 화강암, 편마암, 석회암 등 3종의 암석으로 선정하였으며, 아스팔트 혼합물용 굵은 골재와 부순 모래로 사용하였다. 여기에서 화강암과 편마암은 경기도 일원에 가장 많이 사용되는 암석이며, 석회암은 아직 국내에서는 널리 사용되지는 않지만 골재 석산의 고갈에 따라 최근에 아스팔트 혼합물용 골재로 사용되기 시작한 암석으로 경상북도에서 생산되었다. 그 외의 자연 모래와 석분은 같은 재료를 사용하여 아스팔트 혼합물의 공시체를 제작하였다. 다음의 표 7은 사용된 골재의 품질 시험 결과를 나타낸 것이다.

표 7. 골재의 품질 시험 결과

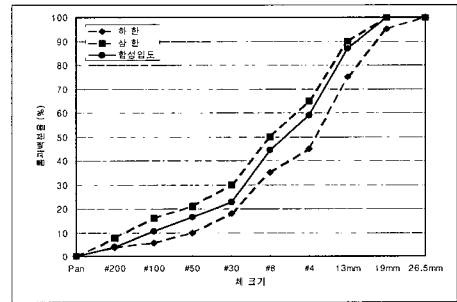
시험 구분	규격	암석 종류	시험 결과	
			굵은 골재	부순 모래
비중	2.5 이상	화강암	2.598	2.631
		편마암	2.737	2.767
		석회암	2.754	2.744
흡수율 (%)	3.0 이하	화강암	0.94	0.78
		편마암	0.63	0.22
		석회암	0.52	0.22
마모율 (%)	35 이하	화강암	33.1	-
		편마암	16.5	-
		석회암	20.3	-

이러한 재료를 사용하여 제조된 아스팔트 혼합물의 아스팔트 함량은 골재 종류에 따른 거동 특성에 대한 분석의 용이함을 위하여, 현장의 19mm 밀입도 혼합물에서 많이 적용하고 있는 5%를 일률적으로 적용하였다. 그림 1과 표 8은

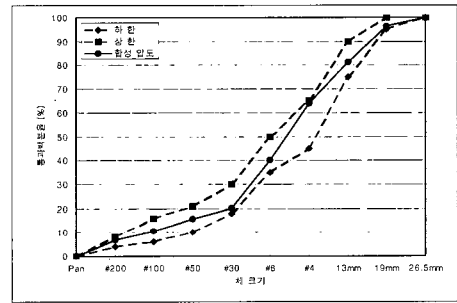
각 골재 종류별로 제작된 아스팔트 혼합물의 합성 입도와 기본 물성 결과를 나타낸 것이다.



화강암



편마암

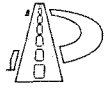


석회암

그림 1. 아스팔트 혼합물의 합성 입도 결과

표 8. 아스팔트 혼합물의 기본 물성 결과

골재 입도	암석 종류	AP함량 (%)	밀도(kg/cm <sup>3</sup> )		공극율 (%)	VMA (%)	포화도 (%)	안정도 (kg)	흐름치 (0.01cm)
			실측	이론					
밀입도	화강암	5.0	2.277	2.440	6.68	17.30	61.4	1153.3	24.9
	편마암	5.0	2.404	2.542	5.43	16.61	67.3	1066.0	20.3
	석회암	5.0	2.452	2.532	3.16	14.58	78.3	1372.1	24.0



## 6. 아스팔트 혼합물의 고온 거동 특성

본 장에서는 3종의 골재 종류별로 제작된 아스팔트 혼합물의 고온 거동 특성에 대해 다루었다. 먼저, 국내의 물성 시험 기준에 대한 적합성을 알아보기 위하여, KS F 2337의 방법에 따라 마찰 안정도 시험을 실시하였다. 이를 통하여 골재의 암석 종류에 따른 안정도 및 흐름치의 변화를 파악하였다. 또한 고온 환경에서 아스팔트 혼합물의 소성 변형 저항성을 모사하기 위해 일본 건설성에서 사용되고 있는 휠트랙킹 시험을 실시하여, 대상 혼합물의 동적 안정도와 단위 침하량을 파악하였다. 이러한 분석 과정들을 통하여, 골재의 암석 종류별로 제작된 아스팔트 혼합물의 고온 거동 특성을 파악하였다.

### 6.1 마찰 물성

그림 2는 골재의 암석 종류별로 각 아스팔트 혼합물의 안정도 및 흐름치를 비교한 것으로 다음과 같은 특징을 갖는 것으로 나타났다.

- 아스팔트 혼합물은 안정도 및 흐름치는 골재의 암석 종류에 다소의 차이를 보였으나, 모두 시방 규정의 기준치(안정도 : 500kg 이상, 흐름치 : 20~40)를 만족하는 것으로 나타났다.
- 아스팔트 혼합물의 안정도 및 흐름치는 골재의 비중, 흡수율, 마모율 등 골재의 물성과

직접적인 관계를 찾을 수는 없었다. 이는 마찰 시험 과정에서 공시체의 파괴 모드가 분명하지 않고, 파괴 형상도 매우 복잡하여 역학적인 분석이 거의 불가능하기 때문인 것으로 판단된다.

### 6.2 휠트랙킹 시험

그림 3은 골재의 암석 종류별로 각 아스팔트 혼합물의 동적 안정도 및 단위 침하량을 비교한 것으로 다음과 같은 특징을 갖는 것으로 나타났다.

- 편마암과 화강암 골재를 사용한 아스팔트 혼합물은 적절한 동적 안정도를 보였으나, 석회암 골재를 사용한 혼합물은 매우 낮은 동적 안정도를 갖는 것으로 나타났다.
- 아스팔트 혼합물의 내유동성에 영향을 미치는 인자는 골재의 비중, 마모율등과 같은 강도 물성보다는 골재군의 공극율이나 골재의 내부 마찰각 등 혼합물의 전단강도와 관련된 요소에 영향을 받는 것으로 판단된다.

그림에서 볼 수 있듯이 석회암 골재를 사용한 아스팔트 혼합물의 동적 안정도가 다른 시료에 비해서 매우 낮게 나타났는데, 이는 마찰 시험 결과와 비교해 볼 때 매우 상반된 결과이다. 앞 절에 의하면, 석회암 골재를 사용한 아스팔트 혼합물의 공극율은 다른 시료에 비해서 상대적으로 낮고, 포화도는 높은 것으로 나타났다. 이러한

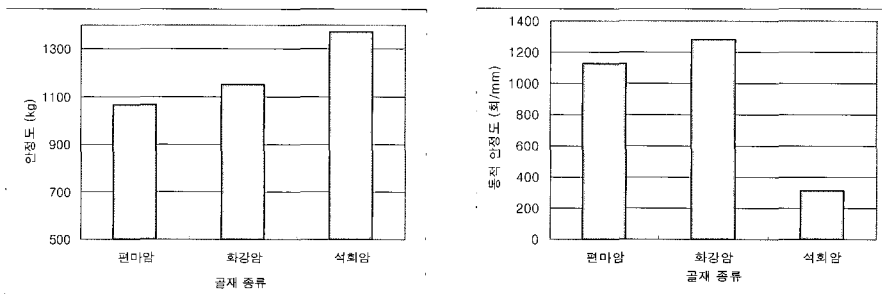


그림 2. 골재의 암석 종류에 따른 아스팔트 혼합물의 안정도 및 흐름치

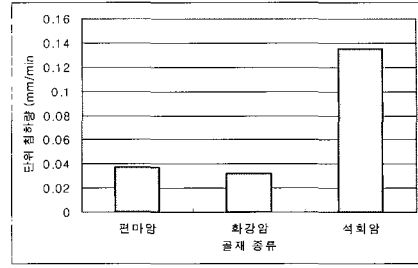
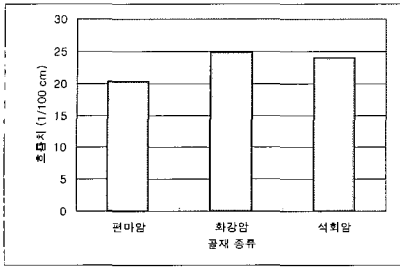
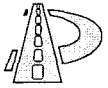


그림 3. 골재의 암석 종류에 따른 아스팔트 혼합물의 동적 안정도 및 단위침하량

결과를 토대로 볼 때, 아스팔트 혼합물의 공극율과 골재의 흡수율은 동적 안정도와 다소 상관관계가 있는 것으로 보이며, 특히 석회암의 경우 골재와 아스팔트 사이의 극성에 의한 영향이 어느 정도 작용할 것으로 사료된다. 그러나 이외에 시험에서 고려하지 못한 골재의 내부 마찰각 등 다른 요소가 이러한 결과에 많은 영향을 미치는 것으로 판단된다.

## 7. 맺음말

골재의 암석 종류에 따른 아스팔트 혼합물의 고온 거동 특성에 대한 분석 결과, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 아스팔트 혼합물은 골재의 암석 종류에 따라 다양한 거동 차이를 보였으며, 혼합물의 고온 물성에 민감한 영향을 미치는 것으로 관찰되었다. 따라서 아스팔트 포장의 소요의 품질을 확보하기 위해서는 사용되는 골재의 선정 및 품질 관리에 신중해야 할 것으로 판단된다.
- 현 국내의 골재 재료에 대한 품질 기준은 아스팔트 혼합물의 거동 특성을 효과적으로 제어할 수 없으며, 많은 규제 항목으로 인하여 새로운 골재원의 개발에 제약이 되고 있다. 따라서 새로운 골재 품질 기준의 마련이 시급한 것으로 사료된다.

## 참고문헌

1. “골재의 채취와 생산”, 한국수자원공사, 1989.
2. “도로 설계 실무 편람”, 한국도로공사, 1997.
3. “비용절감을 위한 도로재료 연구사업 (1-1-C 단계)”, 한국건설기술연구원, 1998.
4. “아스팔트 콘크리트 포장용 골재의 품질향상에 관한 연구(Ⅱ)”, 한국도로공사, 1996.
5. “한국도로공사 표준시방서”, 한국도로교통협회, 1996.
6. “Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design and Construction”, Second Edition, NAPA Education Foundation, 1996.
7. “JIS A 5001 : Crushed Stones for Road Construction”, Japanese Industrial Standard, 1977.
8. “Road and Bridge Specification”, Department of Highway and Transportation, Virginia, 1974.
9. “Standard Specification for Highway Construction”, SCDHPT, Revised 1986.
10. “Standard Specification for Road and Bridge Construction”, Department of Public Works and Buildings, Division of Highway, Springfield, State of Illinois.
11. Yoder, E. J., and Witczak, M. W., “Principles of Pavement Design, 2nd Edition”, Jhon Willy and Sons, New York, 1975.