

## 제강슬래그와 폐아스팔트를 활용한 중온 아스팔트 포장의 거동 분석

### Experimental and Numerical Analysis of Warm Mix Asphalt Pavement prepared using Steel Slag and RAP

이 호 정	Lee, Hojung	포스코건설 R&D CENTER 사원 (E-mail : parja85@poscoenc.com)
장 동 복	Jang, Dongbok	정회원 · 명지대학교 교통공학과 석사과정 (E-mail : insangfa2001@hanmail.net)
김 현 욱	Kim, Hyunwook	정회원 · 포스코건설 R&D CENTER P4 · 교신저자 (E-mail : hkim29@gmail.com)
김 인 태	Kim, In-TaI	정회원 · 명지대학교 교통공학과 부교수 (E-mail : kit1998@mju.ac.kr)
김 기 병	Kim, Kibyoung	정회원 · SK이노베이션 석유기술Lab 부장 (E-mail : kibyoung@sk.com)
이 재 훈	Lee, Jaehoon	포스코건설 인프라사업본부 P4 (E-mail : maple915@poscoenc.com)

#### ABSTRACT

**PURPOSES :** This study aimed to analyze the experimental and numerical behavior of warm mix asphalt pavement prepared using steel slag and RAP and to conduct economic analysis of pavement construction.

**METHODS :** For developing high performance asphalt pavement, we performed three evaluations: fundamental analysis, experimental testing, and 3D finite element analysis. In particular, 3D finite element analysis was conducted on several pavement structures by adopting the results of experimental tests.

**RESULTS :** Through the various evaluations, it was established that steel slag was effective for use as asphalt mixture aggregate. Moreover, asphalt mixture constituting steel slag and RAP demonstrated higher performance behavior compared with conventionally used asphalt mixture. Furthermore, based on the 3D FE modeling, we established that the developed asphalt pavement constituting steel slag and RAP can be utilized for thin layer pavement with comparable performance behavior.

**CONCLUSIONS :** Warm mix asphalt pavement prepared using steel slag and RAP is more competitive and economic compared to hot-mix asphalt pavement. Moreover, it can be applied for preparing thin layer asphalt pavements with reasonable performance. The developed warm mix asphalt pavement prepared using steel slag and RAP can be an alternative pavement type with competitive performance based on the reasonable economic benefit it provides.

#### Keywords

*Steel slag, RAP, WMA, performance, pavement, 3D FE, experimental*

Corresponding Author : Kim, Hyunwook, Sr. Manager  
POSCO E&C Tower 1, 241, Incheon tower-daero, Yeonsu-gu,  
Incheon, 22009, KOREA  
Tel : +82.32.748.1749 Fax : +82.32.748.4034  
E-mail : hkim29@gmail.com

International Journal of Highway Engineering

<http://www.ksre.or.kr/>

ISSN 1738-7159 (print)

ISSN 2287-3678 (Online)

Received Feb. 06, 2017 Revised Mar. 28, 2017 Accepted Mar. 28, 2017

#### 1. 서론

최근 자연환경보전에 관한 법률이 강화되면서 순환골재 활용에 대한 관심이 높아지고 있다. 또한 국토교통부

고시 제 2014-105호(2014)와 환경부고시 제 2014-33호(2014)에 따라 의무적으로 순환골재를 2016년 대비 제품 소요량의 40% 이상 사용해야 하기 때문에 순환골

재의 활용을 위한 기술 개발이 필요한 시점이다.

제강슬래그는 철을 생산할 때 발생하는 산업부산물이다. 우수한 내구성능에도 불구하고 팽창성과 환경적인 인식의 문제로 아스팔트 시멘트 콘크리트재료로 활용되지 못하고 도로노반재나 토목성토재 등 저부가가치 재료로 사용되고 있다. 폐아스팔트 콘크리트(Reclaimed Asphalt Pavement, RAP)는 노후화된 도로를 파쇄하여 발생하는 순환골재로서 경제성이 우수하다. 이에 따라 RAP를 활용한 순환아스팔트 콘크리트의 생산량은 지속적으로 증가하고 있으나 신재아스팔트 콘크리트 생산량에 비해 미비한 실정이다. 기술 개발 및 실용화를 위하여 제강슬래그의 기초물성 및 환경성 평가를 수행하였고 아스팔트포장용 골재로 활용성을 검증하였다. 그 결과를 토대로 RAP와 제강슬래그를 활용한 아스팔트 포장 혼합물을 개발하였으며, 실용화를 위하여 실내 실험을 수행하여 공용성능을 평가하고 일반 아스팔트 포장과의 경제성 비교분석을 수행하였다.

## 2. 아스팔트 혼합물 및 실내실험

### 2.1. 아스팔트 혼합물

#### 2.1.1. 폐아스팔트 콘크리트

RAP는 아스팔트 도로포장의 노후화에 따른 절삭 등 유지보수 시에 발생하는 순환골재로 재생첨가제와 재생드라이어를 통한 가열로 신재아스팔트와 혼합하여 순환아스팔트 콘크리트로 활용된다. RAP의 발생량은 2012년도에 13,032천톤/년으로 2011년도에 비해 154천톤/년도 증가하였다(환경부, 2015). 이는 아스팔트 포장의 노후화에 따라 발생량이 지속적으로 증가되는 것으로 판단되며 증가세가 유지될 것으로 판단된다. 그러나 순환골재 활용 시 성능확보에 대한 불신과 건설폐기물에 대한 부정적인 측면에 의하여 순환아스팔트 콘크리트로의 활용 실적은 부진한 것이 현실이다.

하지만 RAP는 일반골재에 비하여 경제성이 뛰어나기 때문에 정책적인 의무화와 기술개발이 조속히 이루어진다면 대체골재로 활용 가능성이 클 것이라고 판단된다.

본 연구에서는 수도권의 S사와 전라도지역의 N사에서 수급한 RAP를 활용하여 공법개발에 사용하였다. RAP의 특성 중 잔류아스팔트량(%)은 입도에 따라 연소법을 이용한 아스팔트 함량 결정 방법(KS F 2490)에 따라 실험하였으며, 결과는 Table 1과 같다.

Table 1. Asphalt Content of RAP

Size	Weight(%)	AP content(%)
2.5mm <	54	4.07
2.5mm >	46	7.58
Average		5.68

#### 2.1.2. 제강슬래그

철강슬래그는 철을 생산하는 과정에서 발생하는 산업부산물로, 발생하는 공정에 따라 크게 고로슬래그와 제강슬래그로 분류된다. 고로슬래그는 포틀랜드 시멘트와 화학성분이 유사하고 잠재수경성이 있기 때문에 시멘트 원료 또는 혼화재 등으로 사용되나 제강슬래그의 경우 함유된 유리석회로 인하여 팽창성 및 환경적인 문제를 야기시킬 수 있어 대부분 성토용, 도로보조기층 및 기층용 등 비교적 저부가가치 재료로 활용되고 있다. 또한 기존에 제강슬래그는 파우더 형태로 아스팔트 포장에 활용되거나 고온아스팔트 포장의 골재로 활용된 사례는 있으나 지역적인 한계와 위의 언급된 환경적인 문제로 인하여 실적은 미비한 상태이다. 남궁연 등(2006)은 전로슬래그 중 전기로 산화슬래그를 아스팔트 콘크리트 혼합물용 골재로 활용하기 위한 연구를 수행하여 아스팔트 포장용 골재로서의 활용가능성을 제시하였다. 위의 연구에서는 전기로 산화 슬래그를 활용한 혼합물은 환경유해물질이 기준치 이하로 활용이 가능하고 마찰안정도와 동적안정도 실험에서 우수한 결과값을 나타낸다고 밝혔다. 기존의 연구결과에 따라 제강슬래그는 충분히 아스팔트 혼합물용 골재로 활용이 가능하다고 판단되었으며 이에 따라 본 연구에서는 기초물성 및 환경성 평가를 통하여 활용가능성을 확인하였다. 실험을 위하여 광양지역의 P제철소에서 생산된 3개월 이상 에이징된 제강슬래그(전로슬래그 90%, 전기로슬래그 10%)를 활용하였으며, KS 기준에 적합하게 Table 2와 같이 기



Fig. 1 10mm Steel Slag

초물성을 평가하였다. Table 3과 Table 4와 같이 폐기물공정시험기준(환경부, 2014)과 토양오염공정시험기준(환경부, 2013)을 활용하여 한국화학융합시험연구원 에서 환경성 평가를 수행하였으며, 시험결과 모든 기준에 만족하여 아스팔트 포장용 골재로 사용이 적합함을 입증하였다.

Table 2. Result of Steel Slag Fundamental Properties

Item	Unit	Method	Specification	Result	
Density	Surface	g/cm <sup>3</sup>	KS F 2503	≥ 2.45	3.37
	Absolute	g/cm <sup>3</sup>	KS F 2511	≥ 2.5	3.31
Absorption	%			≤ 3.0/3.5	1.68
Soundness (Na2So2):5times	%	KS F 2507	≤ 12	2.7	
Abrasion (C Method)	%	KS F 2508	≤ 35	20.1	
Crushing value	%	KS F 2541	≥ 85	100	
Flat or elongated (3:1)	%	KS F 2575	≤ 30	12.1	
Immersion expansion	%	KS F 2580	≤ 2.0	0.0	

※ MOLIT(2014)

※ KS F 2535 Iron and steel slag for road construction(2012)

Table 3. Result of Steel Slag Environmental Evaluation (Ministry of Environment, 2014)

Item	Specification	Result
Pb	≤ 3mg/L	0
Cu	≤ 3mg/L	0.015
As	≤ 1.5mg/L	0
Cd	≤ 3mg/L	0
Hg	≤ 0.005mg/L	0
Organophosphorus compound	≤ 1mg/L	0
Tetrachloroethylene(PCE)	≤ 0.1mg/L	0
Trichloroethylene(TCE)	≤ 0.3mg/L	0
CN-	≤ 1mg/L	0
Cr+6	≤ 1.5mg/L	0
Oil	≤ 5%	≤ 0.1

Table 4. Result of Steel Slag Environmental Evaluation (Ministry of Environment, 2013)

Item	Specification	Result
Cd	≤ 60mg/kg	2.13
Cu	≤ 2,000mg/kg	5.23
As	≤ 200mg/kg	0
Hg	≤ 20mg/kg	0.05
Pb	≤ 700mg/kg	12.8

Cr+6	≤ 40mg/kg	0
Zn	≤ 2,000mg/kg	295
Ni	≤ 500mg/kg	5.33
F	≤ 800mg/kg	190
Organic phosphorus	≤ 30mg/kg	0
PCBs	≤ 12mg/kg	0
dicyan	≤ 120mg/kg	0
phenols	≤ 20mg/kg	0
benzene	≤ 3mg/kg	0
toluene	≤ 60mg/kg	0
ethylbenzene	≤ 340mg/kg	0
xylene	≤ 45mg/kg	0
Total Petroleum Hydrocarbon(TPH)	≤ 2,000mg/kg	130
trichloroethylene(TCE)	≤ 40mg/kg	0
tetrachloroethylene(PCE)	≤ 25mg/kg	0
benzo[a]pyrene	≤ 7mg/kg	0
Moisture(%)	-	0.6

### 2.1.3. 아스팔트 바인더

1997년 기후변화협약에 의한 교토의정서의 채택 이후 온실가스 감축목표에 따른 온실가스의 절감이 가능한 친환경 기술의 중요성이 부각되었다. 이에 발맞춰 현재 우리나라도로 분야에서는 중온 아스팔트 포장(Warm Mix Asphalt, WMA)의 활용 및 개발이 지속적으로 증가하고 있다. 중온 아스팔트 포장은 일반 아스팔트 포장에 비해 생산 및 시공온도를 약 30℃ 낮춰서 온실가스 및 연료비 저감이 가능한 공법이다.

하지만 지금까지 WMA를 활용한 기술 중 제강슬래그와 RAP를 함께 활용될 수 있는 기술은 개발사례가 없다. 앞서 언급한 바와 같이 제강슬래그와 RAP는 일반 골재를 대체하여 활용할 수 있으며 재활용을 통하여 경제성과 친환경성을 확보할 수 있다. 하지만 일반 아스팔트 바인더를 활용하여 RAP를 활용할 경우 아스팔트 바인더의 골재피복률이 불량하며 RAP의 잔류아스팔트에 의하여 포장체의 스티프니스(Stiffness)가 증가하여 포장의 조기균열의 가능성이 높다. 제강슬래그의 경우에는 일반골재에 비하여 수분저항성이 우수하나 표면의 요철 및 공극이 많아 혼합물을 제조할 때 아스팔트 코팅이 불량할 수 있으며 부식의 가능성이 있어서 문제가 될 수 있다.

이에 따라 위의 단점을 보완하고자 본 연구에서는 골재 혼합성 및 코팅성을 확보하여 중온 작업성 향상 및 제강슬래그 골재의 부식을 억제하고 RAP 내 잔류 아스팔트의 물성을 보강하여 균열저항성을 향상시키는 중온

재생 아스팔트 바인더(Warm Mix Recycled Asphalt, WMRA)를 개발하였다. WMRA는 PG등급에 부합하며 물성은 다음 Fig. 2와 같다.

Table 5. Result of WMRA Binder Properties

Test item	Method	Specification	WMRA 76-22
Storage stability, 163°C/48hr, °C	KS M 2250	≤2.0	0.1
Flash point, COC, °C	KS M 2010	≥260	342
135°C Viscosity, cP	KS M 2392	≤3,000	1,486
G'/sinδ, kPa	KS M 2393	≥1.0@	1.28@76°C
Accelerated aging asphalt(TFOT or RTFO), KS M 2259 or KS M 2258			
G'/sinδ, kPa	KS M 2393	≥2.2@76°C	2.22@76°C
Accelerated aging of asphalt(PAV), KS F 2391			
G'×sinδ, kPa	KS M 2393	≤5,000@31°C	868@31°C
Creep stiffness, MPa at -12°C	KS M 2390	≤300	98
PG Grade	PG 76-22		
	Aggregate layer	Steel slag + RAP Surface/base	

Fig. 2는 골재피복률을 실험하는 장비와 실험 후 골재사진으로, 유럽기준인 EN 12697-11(2012)을 활용하여 실험하였으며 국내에서는 피복률 50%를 기준으로 판단한다. 실험은 화강편마암, 석회암과 제강슬래그 골재를 활용하여 일반 아스팔트와 개발 바인더를 활용하여 수행하였으며, 결과는 Table 6과 같다. 실험결과 제강슬래그의 경우 일반골재보다 아스팔트의 피복률이 우수하였으며, WMRA를 사용할 경우 일반 아스팔트 바인더에 비하여 골재피복률이 높았다.

Table 6. Evaluation of Bitumen-Aggregate Affinity

Item	Area covered by bitumen(%)	
	HMA	WMRA
Granite gneiss	10	55
limestone	50	55
Steel slag	50	60



Fig. 2 Samples after Rolling Test

## 2.2. 실내실험

본 연구에서는 개발 아스팔트 공법의 내구성능 평가를 위해서 일반 아스팔트 혼합물과 재활용골재를 활용한 혼합물의 비교 실험을 수행하였다. 일반 아스팔트 혼합물은 일반골재와 PG등급 64-22와 76-22 아스팔트 바인더를 활용하였다. 개발 아스팔트 혼합물은 제강슬래그와 RAP을 포함한 재활용골재 70% 배합과 재활용골재 100% 배합을 활용하였으며, 아스팔트 바인더는 본 공법에 의하여 개발된 WMRA 76-22를 활용하였다. 재활용골재를 활용한 배합 중 100% 배합은 제강슬래그 70%와 RAP 30%를 혼합하여 높은 비율의 제강슬래그 활용에 따른 공용성능 증진을 알아보기 위하여 설계하였으며, 73% 배합은 제강슬래그 50%에 RAP 23%를 활용하여 제철소에서 생산되는 제강슬래그의 지역적인 한계를 고려하여 제강슬래그의 혼입률 저감에 따른 공용성능 차이를 확인하고자 하였다.

### 2.2.1. 변형강도

김광우 등(2004)에서 아스팔트 혼합물의 변형강도는 소성변형(rutting)에 대한 특성치로 국토교통부 도로포장통합지침(2011)에 마찰 안정도와 변형강도 기준을 병행하여 적용할 수 있도록 하고 있으며, 변형강도 시험은 공시체에 하중을 가하여 얻은 하중-변형 곡선에서 최대하중(P)과 수직변형(y)을 통하여 계산된다고 하였다.

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

여기서,  $S_D$  = 변형강도(MPa)

$P$  = 최대하중(N)

$y$  = 최대하중에서의 수직 변형(mm)

본 실험에서는 공시체를 60°C 항온 수조에서 30분간 수침 후 꺼내어 재하속도 30mm/min으로 하중을 가하여 실험하였으며, 3개의 공시체(Ø100mm, h 63mm)를 실험하여 평균값을 결과값으로 사용하였다. 또한 밀도는 KS F 2446(2000)의 측정방법에 따라 측정하였으며, 공극은 KS F 2364(2013)를 통하여 산출하였다.

실험결과 일반 개질 밀입도 아스팔트 혼합물에 비하여 재활용골재 100% 혼합물의 경우 동등이상의 값을 나타냈으며, 73% 혼합물의 경우 성능이 다소 떨어지나 이는 국토교통부 도로포장통합지침(2011) 표층용 아스팔트

혼합물의 품질기준 중 변형강도 적용 시 변형강도의 일  
 반기준인 3.20MPa 이상과 증차량기준인 4.25MPa 이  
 상을 만족하였다.

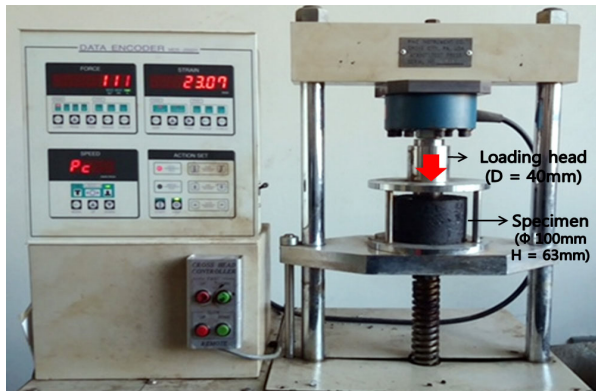


Fig. 3 Deformation Strength Test

Table 7. Result of Deformation Strength Test

No.	Mixture	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Air(%)	Deformation strength(MPa)
1	PG 64-22 Granite 100% WC-3	2.429	4.27	4.05
2	PG 76-22 Granite 100% WC-2	2.418	4.2	6.50
3	WMRA 76-22 RAP+Steel slag 100% WC-3	2.709	4.4	6.63
4	WMRA 76-22 RAP+Steel slag 73% 10mm	2.602	4.1	4.62

### 2.2.2. 회복탄성계수

아스팔트 혼합물의 회복탄성계수 시험은 공시체의  
 원주면에 하중을 재하하는 간접인장강도실험을 활용한  
 방법으로 수행되었다. 공시체에 하중이 가해지는 순간  
 수평 변형이 일어나고 이에 따라 순간적으로 회복되는  
 변형을 순간회복변형  $\Delta H_I$ , 휴지기간내 회복되는 변형  
 을 전회복변형  $\Delta H_T$ 라 하며 회복탄성계수( $M_{RT}$ )는 아  
 래의 Eq.(2)와 같이 KS F 2376(2014)에 의하여 산출  
 하였다.

$$M_{RT} = P(V_{RT} + 0.27)/t\Delta H_T \quad (2)$$

여기서,  $P$  = 반복하중(N)

$V_{RT}$  = 전체회복 푸아송비

$M_{RT}$  = 전체 회복탄성계수(MPa)

$t$  = 공시체 두께(mm)

$\Delta H_T$  = 전체회복 수평변형(mm)

본 실험에서 하중은 120kgf를, 하중주기는 1Hz의 주기  
 로 실험하였으며 반복재하 100회 후 5회 재하 시의 변형  
 을 측정하여 회복탄성계수를 결정하였다. 또한 수직 변형  
 은 일반적으로 적용되는 아스팔트 혼합물의 푸아송 비인  
 5℃에서 0.2, 25℃에서 0.35, 40℃에서 0.5를 적용하여  
 측정하였다. 로드셀은 재하방향 Fig. 4와 같이 하중이 재  
 하되는 부분과 변형이 일어나는 부분에 부착하였다.

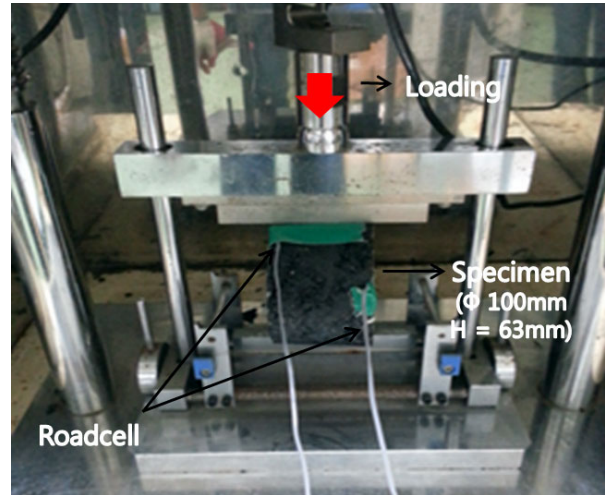


Fig. 4 MR Test

Table 8. Result of MR Test

No.	Mixtures	MR(MPa)		
		5℃	25℃	40℃
1	PG 64-22 Granite 100% WC-3	8,100	2,917	1,392
2	PG 76-22 Granite 100% WC-2	26,144	8,505	1,563
3	WMRA 76-22 RAP+Steel slag 100% WC-3	21,433	8,144	1,792
4	WMRA 76-22 RAP+Steel slag 73% 10mm	29,473	4,908	2,180

MR test결과 일반 개질 밀입도 아스팔트 혼합물에  
 비해 재활용골재 100% 혼합물의 경우 5℃와 25℃에서  
 낮고 40℃에서 높은 값을 나타냈으나 차이가 크지 않았  
 다. 재활용 골재 73% 혼합물의 경우에는 5℃, 40℃에  
 서 높은 값을 나타내었으나 차이가 크지 않았으며 25℃  
 에서는 약 40% 정도의 차이가 났다. 또한 Fig. 5에서  
 나타나듯이 재활용 골재 100% 혼합물의 경우 온도에  
 대한 기울기가 완만하여 온도 민감성이 낮은 것으로 판  
 단되나 73% 혼합물의 경우 가파른 기울기를 보여 온도  
 민감성이 높은 것으로 판단된다. 이는 성상이 다른 2중,  
 3중 골재를 활용하여 혼합물을 제조하기 때문에 생기는

차이라고 판단되며 바인더와 배합설계에 대한 지속적인 피드백을 통하여 개선할 예정이다.

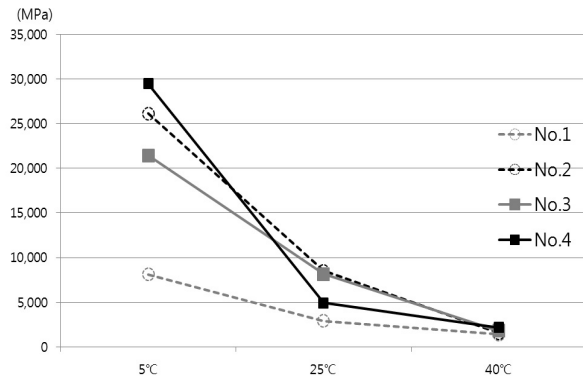


Fig. 5 Result of MR Test

### 3. 3차원 유한요소 해석

개발된 아스팔트 포장 공법에 대하여 3차원 비선형 유한요소해석 기법 적용 및 포장 시스템 거동 분석을 통해 포장의 파손 가능성 검증을 실시하였다. 유한요소 해석은 포장체를 여러 개의 요소(Element)로 나누어서 각 요소의 거동을 모사하여 전체 포장체의 거동을 해석하는 수치해석 방법이다.

#### 3.1. 아스팔트 포장 해석 모델

본 아스팔트콘크리트 구조해석을 위한 유한요소모델은 하중의 영향범위를 고려하여 길이방향 10m, 횡방향 9m에 대한 정방형 매쉬로 총 63,890개의 Node와 22,748개의 Element로 구성되었으며, 정밀해석을 위해 9층으로 분할하였다. 일반적인 고속도로 설계단면을 참고하여 고속도로 및 일반 국도 적용단면 표층 5cm, 중간층 7cm, 기층 20cm, 보조기층 30cm, 노상 250cm로 설정하였다. 중온 박층 포장에 대한 적용성 검토를 위해 표층 두께를 각각 2.5cm, 3.5cm, 5cm로 설정하여 모델을 개발하였다.

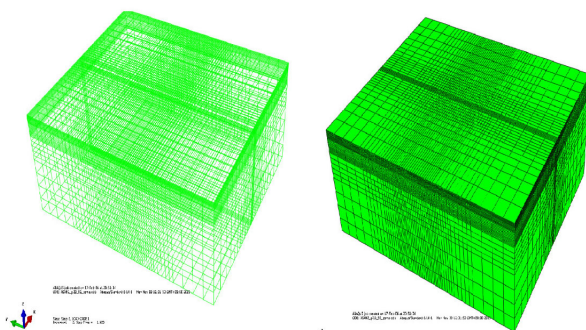


Fig. 6 FEM Modeling

Table 9. Asphalt Concrete Cross Section

Item	Asphalt concrete	
Case 1		Surface(HMA PG64-22) : 5cm
		Intermediate(HMA PG64-22) : 7cm
		Base : 20cm
		Subbase : 30cm
Case 2		Subgrade : 250cm
		Surface(WMRA PG76-22) : 3.5cm
		Intermediate(WMRA PG76-22) : 7cm
		Base : 20cm
Case 3		Subbase : 30cm
		Surface(WMRA PG76-22) : 2.5cm
		Intermediate(WMRA PG76-22) : 7cm
		Base : 20cm
		Subgrade : 250cm

#### 3.2. 적용하중 및 재료물성

아스팔트층의 물성치 추정은 내구성능 실험 결과를 활용하여 산출하였으며, 경제성을 고려하여 WMRA 76-22 재활용골재 73% 밀입도 10mm 배합의 물성을 활용하였다. 아스팔트 혼합물의 물성치 정량화를 위해 수행된 시험결과 중 온도대역별 동탄성계수 측정 결과를 바탕으로 산출하였으며, 중간층 및 기층에 대한 물성은 상대강도계수 비율로 보정하여 적용하였다. 유한요소해석에 적용된 아스팔트 표층의 물성은 계절별로 구분한 온도와 전체 평균온도에 해당하는 물성을 적용하였다. 이를 통해 피로수명에 대한 예측을 할 수 있게 되었다. 다음 Table 10과 Table 11은 아스팔트 혼합물 적용 물성치에 따른 구분으로 일반 아스팔트 포장을 Case1, 개발공법의 3.5cm 포장을 Case2, 개발공법의 2.5cm 포

Table 10. Mixtures Properties (Surface, Intermediate, Base)

Item	Layer	MR(at 15°C) (MPa)	Poisson's ratio( $\nu$ )	
Case1	HMA t=5.0cm	Surface	5,509	0.30
		Intermediate	5,509	0.30
	Base	4,695	0.30	
Case2	WMRA t=3.5cm	Surface	17,190	0.30
		Intermediate	17,190	0.30
	Base	4,695	0.30	
Case3	WMRA t=2.5cm	Surface	17,190	0.30
		Intermediate	17,190	0.30
	Base	4,695	0.30	

Table 11. Mixtures Properties (Subbase, Antifreezing Layer, Subgrade)

Item	MR(at 15°C) (MPa)	Poisson's ratio( $\sigma$ )
Subbase	118	0.35
Antifreezing layer	118	0.35
Subgrade	73	0.45

장을 Case3로 구분하여 해석을 실시하였다. 또한 구조 해석 시 적용할 아스팔트 포장 물성치는 우리나라 연평균 기온인 15°C를 기준으로 보정하여 적용하였다.

재하하중은 AASHTO 포장 설계법에서 적용되는 등가단축하중 환산계수의 기준이 되는 8.2ton 등가단축하중을 적용하였다. 접지면적은 접지압에 좌우되며, 축하중은 전 접지면적에 동일하게 분포된다고 가정, 해석 시 타이어모양 구현을 위해 실제 타이어 접지면적과 동일한 접지압을 받는 등가의 모델로 전환하였다.

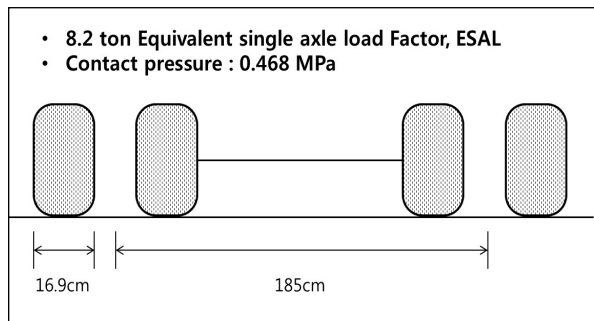


Fig. 7 Under Loading

### 3.3. 구조해석 결과

아스팔트 포장체에 반복적으로 발생하게 되는 수평인장응력은 포장 하부에서 피로에 의한 균열을 발생시키는 원인이 되고 일정 횟수 이상 하중이 반복적으로 재하된 이후에 균열이 발생한다. 따라서 수직 재하 하중에 의한 파손 가능성을 판단할 수 있는 척도는 아스팔트 포장 층 내에서 발생하는 최대인장응력으로 볼 수 있다. 본 해석에서 단축하중에 의하여 발생하는 Case1의 아스팔트 혼합물내 최대인장응력은 0.400MPa로 Case2, 3보다 크게 나타났다. 이는 Case2, 3에 해당하는 박층포장이 Case1에 비해 포장하부에서 상부로 진행되는 Bottom-Up 균열에 의하여 피로 파손이 일어날 가능성이 적다는 점을 의미한다. 표층 두께 3.5cm인 Case2의 최대인장응력이 0.368MPa로 가장 낮아 내구성 측면에서 우수한 것으로 나타났으며, Case3은 0.390MPa로 Case2에 비해 6% 가량 최대인장응력이 더 큰 것으로 나타났으나, 차이가 비교적 적었다. 각

포장체의 최대인장응력은 하부재하 지점부 아스팔트 혼합물의 가장 하부층(기층)에서 종방향으로 발생하는 것으로 나타났다. 아래 Fig. 8은 각각의 케이스별 횡방향 인장변형률에 대한 해석 결과 예시로 적색에 가까울수록 변형률이 큰 것을 의미한다.

Table 12. Result of FEM Analysis

Item	Asphalt layer				Upper subgrade	
	Maximum tensile stress(MPa)	Maximum compressive stress(MPa)	Maximum tensile strain( $\mu\epsilon$ )	Maximum compressive strain( $\mu\epsilon$ )	Vertical strain( $\mu\epsilon$ )	
Case 1 (t=5cm)	Longitudinal	0.400	0.647	64.3	57.2	384.3
	Transverse	0.306	0.555	37.3	34.7	
Case 2 (t=3.5cm)	Longitudinal	0.368	1.087	58.8	36.9	309.6
	Transverse	0.283	0.883	34.6	20.4	
Case 3 (t=2.5cm)	Longitudinal	0.390	1.170	62.4	40.3	375.7
	Transverse	0.299	0.956	36.4	22.8	

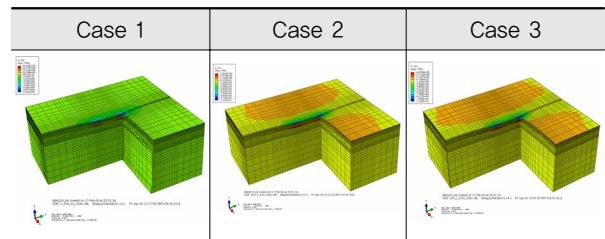


Fig. 8 Result of FEM Maximum Tensile Stress

일반적으로 아스팔트 포장체는 인장 강도의 50% 이상 인 응력이 반복적으로 발생할 경우에 피로에 의한 균열 발생 가능성이 높아지는 것으로 알려져 있으며 본 해석에서는 모두 추정된 인장강도 대비 발생된 응력이 50% 미만으로 균열 발생 가능성은 낮은 것으로 나타났다. 특히 Case2, 3의 경우는 10% 미만으로 현저하게 낮아지기 때문에 조기 파손 가능성은 매우 낮은 것으로 판단된다.

### 3.4. 공용 수명 검토

공용 수명 검토를 위해 일반 국도의 일일 평균 교통량을 기준으로 10년 동안 등가환산 교통량을 산정하였다. 교통량 통계시스템에서 수집한 전체 국도의 평균 교통량을 적용하였고, 일반 Case1 분석결과와 Case2, 3의 공용수명을 비교하였다.

국도의 평균 교통량을 기준으로 아스팔트 소성변형과 피로에 대한 공용수명 검토를 수행하였으며 AI (Asphalt Institute), Shell, TRRL 등 예측모형을 활용하였다. 소

성변형은 일반적으로 외부적인 변수가 많은 소성변형 수명 검토에 대하여 예측이 어려운 측면이 있지만 위의 예측모형을 통하여 노상 상부의 압축변형률에 의한 추정을 수행하였다. 또한 피로 공용수명 검토는 아스팔트 포장 하부의 수평인장변형률이 피로파손에 의하여 발생하는 균열과 직접적인 상관관계를 이용하여 수행하였다. 이러한 상관관계는 공용성 예측 모델에 의하여 변형률의 크기에 의해서 결정되는 허용 가능한 반복하중 횟수(포장의 공용수명)로 정량화가 가능하다. 일반적으로 아스팔트 포장의 구조적 파손은 반복적인 교통하중의 재하에 의한 피로로 정의할 수 있기 때문에 산출된 변형률 값을 사용하여 포장의 피로 공용수명을 추정할 수 있다.

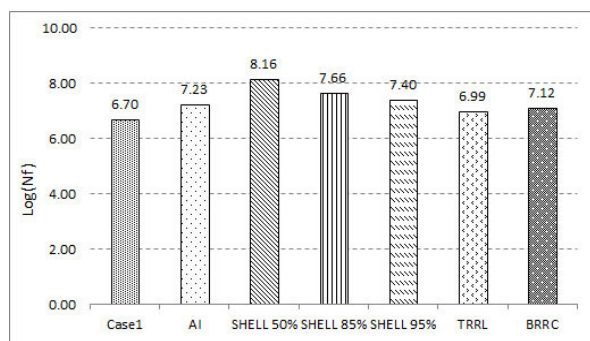


Fig. 9 Result of Service Life Prediction Using Rutting (Case2)

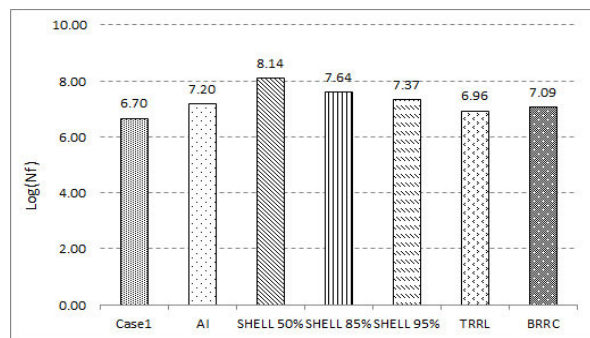


Fig. 10 Result of Service Life Prediction Using Rutting (Case3)

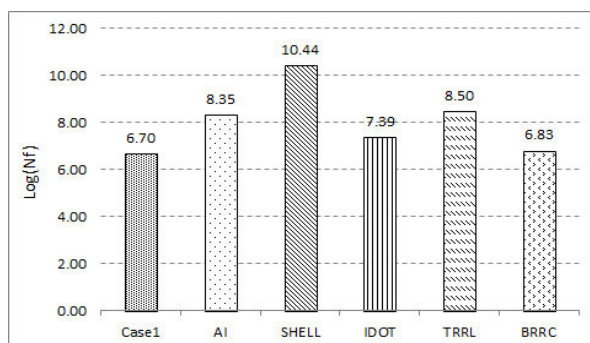


Fig. 11 Result of Service Life Prediction Using Fatigue (Case2)

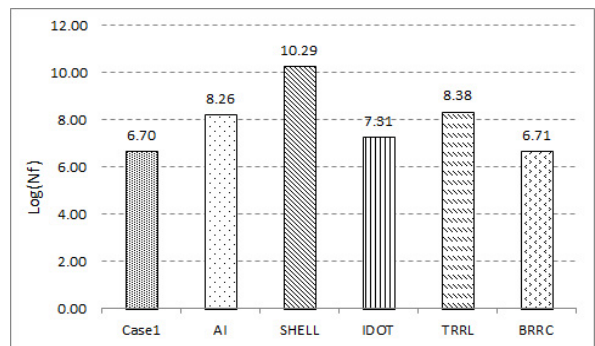


Fig. 12 Result of Service Life Prediction Using Fatigue (Case3)

### 3.5 아스팔트 공용 수명 비교

본 연구에서는 피로 공용수명을 통하여 공용 수명 비교를 수행하였으며, 보수적인 접근을 위하여 각 수명예측 모델 중 BRRC를 활용하였다. Case1의 해석 결과의 기준으로 Case2, 3에 대한 비교를 실시하였다. 예측 모델 결과를 토대로 아스팔트 공용 수명을 산출하였으며, 산출된  $\text{Log}(N_f)$  값을 교통량 축하중으로 전환하여 추정하였다. 전환된 축하중 교통량은 앞서 산출한 10년 등가환산 교통량을 기준으로 나누어 아스팔트 공용 수명을 산출하였다. 도로 수명 산출 결과 도로의 수명이 Case1의 경우 8년 10개월, Case2의 경우 13년 6개월, Case3은 10년 2개월로 산출되었다.

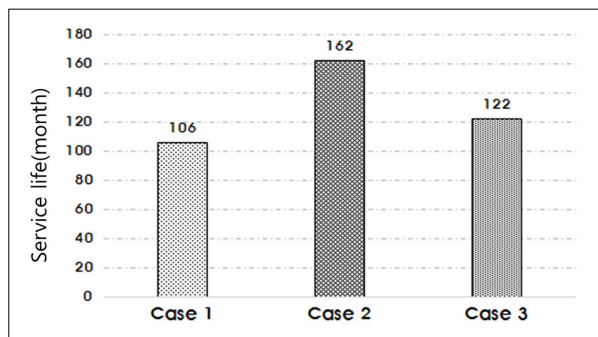


Fig. 13 Result of Service Life Prediction Using Equivalent Traffic

### 4. 도로 공용년수 비교를 통한 경제성 분석

제강슬래그와 RAP를 활용한 아스팔트 혼합물의 실내 실험 및 유한요소분석을 통해 개발공법의 공용성 분석을 실시한 결과 도로의 수명이 일반 아스팔트 혼합물 대비 공용수명이 높게 산출되었다. 일반 아스팔트 포장과 개발공법의 경제성 분석은 도로의 증가 수명을 고려한 도로 유지보수비용 산출을 통해 분석하였으며, 경제



성 분석의 경우 보수적인 관점에서 Case3을 기준으로 분석을 실시하였다.

#### 4.1. 경제성 분석방법

도로의 유지보수비용은 도로의 수명이 다해 공용되기 어렵거나 예방적 유지보수에 의해 발생하지만 본 연구에서는 예방적 유지보수를 제외하고 도로의 수명이 다했을 때 실시하는 도로 유지보수비용을 기준으로 경제성 분석을 실시하였다. 일반 아스팔트 혼합물을 활용한 포장의 수명을 10년으로 가정할 경우 도로의 수명이 다한 시점인 10년 뒤에 도로 유지보수를 실시하게 되며 이때 유지보수비용이 발생하게 된다. 개발 아스팔트 혼합물을 활용한 도로의 수명이 11년으로 증가했다면 도로의 수명이 다한 시점인 11년 뒤에 도로 유지보수비용이 발생하게 된다. 하지만 일반 아스팔트 포장의 경우 유지보수비용이 10년 뒤에 발생하고 개발 아스팔트 포장의 경우 11년 뒤에 발생하는 차이점이 있다. 즉 일반 아스팔트 혼합물을 활용한 도로포장에서 10년간 필요로 하는 유지보수 비용과 슬래그를 활용한 11년간 필요로 하는 유지보수 비용이  $\alpha$ 로 같지만 1년간 유지보수비용은 일반 아스팔트 혼합물을 활용할 때 유지보수비용이 더 많이 발생함을 의미한다( $\gamma_1 > \gamma_2$ ).

일반 아스팔트 포장 1년간 유지보수 비용(공용수명 10년)

$$\gamma_1 = \frac{\sum_{n=1}^{10} a_n}{10} \quad (3)$$

개발 아스팔트 포장 1년간 유지보수 비용(공용수명 11년)

$$\gamma_2 = \frac{\sum_{n=1}^{11} b_n}{11} \quad (4)$$

Table 13. Service Life Extension Benefit Calculation

Item	Maintain cost per year (Won/km·lane)	Benefit (Won/km·lane)
Case 1	$\gamma_1(\alpha/10)$	A ( $\gamma_1 - \gamma_2$ )
Case 3	$\gamma_2(\alpha/11)$	

증가되는 도로의 수명을 반영하기 위해 최종적으로 산출되는 유지보수 비용  $\alpha$ 를 도로 수명으로 나누어 1년간 유지보수비용을 산출한다. 일반 아스팔트 포장의 경우 유지보수비용을 공용기간 10년으로 나누어 1년간 유지보수비용이  $\gamma_1$ 으로 산출되고, 슬래그를 활용한 아

스팔트 포장은 공용기간 11년으로 나누어 1년간 유지보수비용이  $\gamma_2$ 로 산출된다. 이때 발생하는 1년간 유지보수비용의 차이  $A(\gamma_1 - \gamma_2)$ 를 편익으로 산출하였다.

이때 발생하는 유지보수비용은 일반 아스팔트 포장과 개발 아스팔트 포장이 동일하다고 가정하였다. 개발 아스팔트 포장의 경우 박층 포장으로 물량의 절감을 통하여 비용절감이 가능하나 제강슬래그의 지역적 한계로 인하여 비용을 명확하게 선정하기에 어려움이 있다. 따라서 가장 보수적으로 일반 유지보수비용과 동일하게 가정하였다.

#### 4.2. 유지보수비용 산정

앞서 산출한 편익 산출방안 적용을 위해 아스팔트 포장 유지보수 공법을 절삭 덧씌우기로 선정하였다. 유지보수공법의 비용은 실제 유지보수 데이터를 통해 추정된 포장 두께별 면적 비율을 고려한 표준단가자료를 활용 1m<sup>2</sup> 당 40,385원의 유지보수 비용을 적용하였다. 유지보수 비용의 적용 대상은 총 연장 1km, 도로폭 3.5m 총 면적 3,500m<sup>2</sup>에 대한 유지보수 비용을 산출하여 1년간 유지보수비용을 비교하였다.

총면적 3,500m<sup>2</sup>에 해당하는 면적의 유지보수비용은 약 1억 4,000만원이며, 해당 면적의 유지보수비용을 앞서 산출된 도로 수명 8년 10개월(Case1), 10년 2개월(Case3)로 나누어 1년간 유지보수비용을 산출한 결과 일반 아스팔트 포장의 경우 1년간 유지보수비용은 약 1천980만원, 개발 아스팔트 포장의 경우 1년간 유지보수비용은 약 1천727만원으로 산출되었다. 이때 발생하는 유지보수비용 절감편익은 약 253만원으로 슬래그를 활용한 아스팔트 포장이 일반 아스팔트 포장에 비해 1년간 유지보수비용이 약 13% 감소하였다.

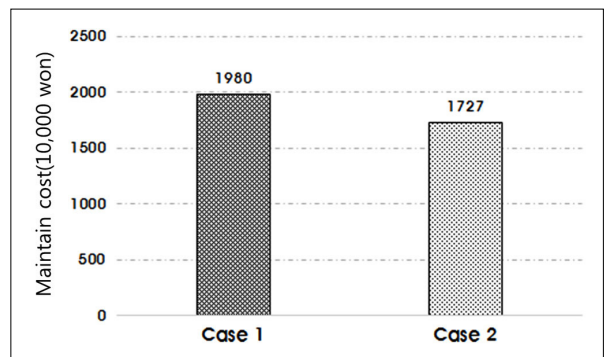


Fig. 14 Maintain Cost Per Year

### 5. 결론

본 연구에서는 RAP와 제강슬래그를 활용한 중은 아

스팔트 포장 공법의 개발과 실용화를 위하여 공법의 공용성을 파악하고 일반 아스팔트 공법과 경제성을 비교 분석하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 제강슬래그는 아스팔트 골재용 품질기준과 도로용 철강 슬래그(KS F 2535, 2012)을 만족하여 기초물 성이 우수하며 폐기물공정시험기준(환경부, 2014)와 토양오염시험기준(환경부, 2013)을 만족하여 환경적으로 문제가 없기 때문에 아스팔트 혼합물용 골재로 활용이 적합하다.
2. 본 연구에서는 제강슬래그와 페아스콘을 활용하여 다양한 아스팔트 포장공법을 개발하였으며, 본 논문에서는 재활용골재 100%, 73% 활용한 아스팔트 포장공법을 검토하였다. 특히, 재활용골재 100% 혼합물의 내구성능 평가 결과, 일반 개질 아스팔트에 비해 내구성능이 동등이상임을 확인하였다. 변형강도의 경우에는 국토교통부의 변형강도 기준인 3.20MPa(일반), 4.25MPa(중차량)를 만족하는 결과를 나타냈다.
3. 개발 공법의 내구성능 평가 결과를 토대로 실시한 3차원 유한요소 해석 결과 중 아스팔트 하부의 최대 횡방향 인장 변형률을 활용하여 공용성 분석을 수행한 결과 Case1(일반 아스팔트 포장)은 8년 10개월, Case2(개발공법, 포장두께 3.5cm)는 13년 6개월, Case3(개발공법, 포장두께 2.5cm)는 10년 2개월로, 제강슬래그와 페아스팔트 콘크리트를 활용한 중온 아스팔트 포장 공법을 박층으로 적용하여도 일반 아스팔트 포장에 비해 우수한 공용성능이 나타남을 확인하였다.
4. 일반 아스팔트 혼합물을 활용하여 5cm두께의 도로 포장과 슬래그와 페아스콘을 활용한 2.5cm두께의 도로포장에 대한 공용년수 예측 결과를 토대로 두 포장에서 필요로 하는 1년간 도로 유지보수비용을 산출한 결과, Case1(일반 아스팔트 포장) 대비 Case3(개발공법, 포장두께 2.5cm)에서 유지보수비용이 약 13% 절감됨을 확인하였다. 슬래그를 활용한 도로포장의 표층 두께를 일반 아스팔트 혼합물 활용 포장 대비 2.5cm로 설계하였음에도 발생하는 1년간 도로 유지보수비용이 적게 산출되었다. 슬래그를 활용한 아스팔트 혼합물은 도로 포장체의 공용성능 향상뿐만 아니라 경제성 확보에도 용이하다고 판단된다.

## 감사의 글

본 논문은 국토교통부와 국토교통과학기술진흥원의 교통물류사업인 “온실가스 배출 최소화를 위한 친환경 포장도로 연구”의 연구지원으로 수행되었으며 이에 관계자 분들께 감사드립니다.

## REFERENCES

- ANGELI MARIZ URBANO GAMEZ(2011), 「IMPACT OF CURING TIME ON WARM MIX ASPHALT SHORT-TERM PERFORMANCE」, Submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Civil Engineering in the Graduate College of the University of Illinois at Urbana-Champaign.
- British Standard Institution(2012), Bituminous mixtures. Test methods for hot mix asphalt. Determination of the affinity between aggregate and bitumen.
- Hibbitt, 「ABAQUS Theory manual and users manual」, Karlsson & Sorensen, Inc.
- Jun Zhang(2010), 「Effects of Warm-mix Asphalt Additives on Asphalt Mixture Characteristics and Pavement Performance」, University of Nebraska - Lincoln.
- Kgs.Lyngby(2012), 「CALCULATION OF ASPHALT PRODUCTION ENERGY FLOW TO COMPARE WARM AND HOT MIX ASPHALT」, 5TH Eurasphalt & Eurobitume Congress, 13-15TH June 2012, Istanbul.
- Korean Standards Service Network(2006), KS F 2490, “Standard test method for asphalt content of hot-mix asphalt by ignition method”.
- Korean Standards Service Network(2007), KS F 2511, “Testing method for amount of material finer than 0.08 mm sieve in aggregate”.
- Korean Standards Service Network(2007), KS F 2507, “Method of test for soundness of aggregates by use of sodium sulfate”.
- Korean Standards Service Network(2007), KS F 2508, “Method of test for resistance to abrasion of coarse aggregate by use of the Los Angeles machine”.
- Korean Standards Service Network(2014), KS F 2541, “Testing method for determination of aggregates crushing value”.
- Korean Standards Service Network(2014), KS F 2575, “Standard test method for flat or elongated particles in coarse aggregate”.
- Korean Standards Service Network(2014), KS F 2580, “Test method of the immersion expansion in 80°C water of the iron and steel slag”.
- Korean Standards Service Network(2014), KS F 2446, “Standard test method of test for bulk specific gravity and density of compacted bituminous mixtures using saturated surface dry specimens”.
- Korean Standards Service Network(2014), KS F 2364, “Standard test method for percent air voids in compacted dense and open asphalt mixtures”.

- Korean Standards Service Network(2014), KS F 2376, "Standard test method for determining the resilient modulus of asphalt mixtures using indirect tensile mode".
- Kwang W. Kim, Young S. Do, Ki H. Lee, Mun J. Cho, Seung J. Kwon, (2004) "A Mechanistic Consideration of Deformation Strength by Kim test," Korean Society of Road Engineers.
- Mr.Lou Politana(2012), 「Warm Mix Asphalt - A greener Alternative to Hot Mix Asphalt」, Ministry of Transportation of Ontario.
- Namkoong, Youn, Han Jong Min, Lee Suck Hong, Suh Soon Il(2006), "A Study for Asphalt Concrete Mixture using EAF Steel Slag", Korean Society of Road Engineers.
- NCHRP(2004), 「Guide for Mechanistic-Empirical Design」.
- Ning Lee · hai-Pei CHOU · Kuan-Yu CHEN(2011), 「Benefits in Energy Savings and CO<sub>2</sub> Reduction by Using Reclaimed Asphalt Pavement」, Department of Civil Engineering (National Taiwan University).
- Seong H. Lee, Kwang W. Kim, Ji Y. Park, Jae B. Yang, Il-Ho Na (2014), "An analysis of resilient modulus for different types of asphalt mixtures", The Korean Society for Railway.
- Yang H. Huang(1993),「Pavement Analysis and Design」, University of Kentucky.