아스팔트 혼합물의 역사 (3 · 완)

김 주 원*

지난호 게재내용

1. 머리말
2. 19세기의 아스팔트 포장
3. 1900년 부터 1920년대 까지의 아스팔트 포장
4. 1930년대 이후 제2차 대전까지의 역사
5. 제2차 대전이후

6. 역학시험에 의한 배합설계

6.1 시험방법의 발전

아스팔트 혼합물의 역학시험은 1921년 Smith에 의한 충격시험으로 시작된다고 할 수 있다. 그 후 1925년 Hubbard와 Field에 의해 일종의 전단시험이 제안된다. 그 후 오늘날에 이르기까지 여러 가지 시험이 제안되었으며, 이들을 대별하면 다음과 같이 분류된다.

- 1축압축시험
- 3축압축시험
- 인장시험
- 휨(bending)시험
- 전단시험
- 압출시험(전단시험의 1종)
- 관입시험(전단시험의 1종)
- 충격시험
- 동적재하시험
- 기타 시험(진동, 마모 등)

이들 시험의 다수는 1930~1940년대에 제안된 것들이다. 대부분의 시험은 공시체에 대하여 어느 형태로 응력을 주어 변형에 대한 저항성의 정도를 측정한다고 하는 점에서는 일치한다. 그러나 복잡하게 작용하는 교통하중하에서 그것도 온도에 의해 그의 콘시스텐시가 달라지는 아스팔트 혼합물을 생각할 때 어느 시험법을 채택하여도 완전한 것은 아니라는 것은 짐작할 수 있다. 따라서 이들 시험방법 중에는 현재에도 이용되고 있는 것도 있으나 다수는 실정에 맞지 않거나 비합리적이라는 이유로 완전히 잊혀진 것도 있다.

Hubbard-Field법으로 대표되는 압출시험도 1종의 전단시험으로 1957년에는 미국의 11개 주에서 배합설계에 이용되었으나 포장에서의 현실적인 역학상황과는 맞지 않다고 볼 수 있다. 이 중에서 Vokac은 충격시험과 압축시험을 시도하여 압축시험의 결과가 포장의 잘, 잘못을 판정하는데 도움이 된다고 하였고, Taylor도 직접전단시험 보다 압축시험이 보다 유효하다고 하였다. 한편 Lee, Markwick 그리고 Pfeiffer는 포장이 놓여지는 상황에서 압축과 같이 인장에 대한 저항성도 중요하

* 참여회원 · 성원건설기술사사무소 소장

다고 하여 휨시험 또는 인장시험의 중요성을 설명하였다.

그러나 Stanton과 Hveem에 의하면 인장강도는 교통하중에 의한 파괴작용에 대한 기본적인 성질은 아니라고 하여 1935년에는 인장에 의한 변형속도의 중요성을 강조하고, 다른 다수의 연구자도 온도의 저하에 따른 압축강도의 증가에 동의하면서 인장강도는 극대치를 갖는 고온범위와 저온범위에서는 현저하게 강도가 저하하는 것을 지적하고 있다. 그리고 다시 Neumann은 저온상태에 놓여진 혼합물중에는 인장응력이 발생하고, 균열파괴의 대부분은 겨울철에 발생하는 것으로 보아 오늘날 내부응력에 의한 저온파괴를 지적하였다.

3축시험의 기본개념은 1901년 Adams와 Nicholson에 의해 대리석의 변형거동에 관한 연구에 적용하였던 것이 최초의 일이었으나, 포장에 3축개념을 최초로 도입한 것은 Stanton과 Hveem이다. 즉 오늘날에도 캘리포니아주에서 배합설계에 이용되고 있는 스테빌로미터이다. 그 후 이른바 3축시험은 Pfeiffer와 Endersby 등에 의해 도입되어 많은 성과를 남겼으며, 1945년에는 미국 아스팔트협회의 설계지침에 도입되기에 이른다.

1940년대 후반에 이르러 3축시험의 결과는 재료역학에 기초를 두고, 합리적으로 혼합물의 역학거동이 해석될 수 있다는 것에서 많은 연구자에 의해 취급되어 1949년에는 Smith의 3축으로 오늘날에도 알려져있는 배합설계법이 제안되었다. Smith의 설에 의하면 3축시험에 의한 배합설계에서는 통상적으로 쓰이고 있는 아스팔트량보다도 약간 적은 쪽에서 혼합물이 최대강도로 되므로 당시에 일반적으로 쓰이고 있던 Hveem방법이나 Hubbard-Field방법 등에 의한 배합설계보다 소성변형이나 유동 등에 대하여 안전한 설계가 가능하다고 하였다.

1948년 군사시설에 아스팔트포장 건설을 위하여 혼합물의 배합설계가 이른바 마샬시험에 의해 시행되어 배합설계와 관리에 대한 검토가 대규모의 시험포장에 의해 시행되었다. 마샬시험에 의한 배합설계의 개념은 1943년 미시시피주 도로국의 기술자이었던 B. Marshall에 의해 제안되게 된다. 오늘날의 마샬시험방법으로 확립되기까지의 경과는 후술하기로 한다. 당시 아스팔트 혼합물에 요구된 성질은 오늘날에 있어서도 기본적으로는 동일하나 영구변형에 대한 저항성, 결국 안정성과 동시에 기층의 변형에 추종하는 능력, 즉 가요성(flexibility)이었다.

가요성포장이라고도 부르는 아스팔트포장의 가장 큰 이점은 약간의 변형에 추종한다고 하는 것이며, 당시에는 이 가요성의 평가가 가장 중요하였다고 생각된다. 이러한 사고를 전제로 하여 Griffith와의 토론에서 Nevitt는 마샬시험이 가요성과 안정성의 두 가지를 가장 적절하게 표현한 것이라고 높이 평가하는 한편으로는 1950년 McLeod는 마샬시험이 기본적으로는 1축압축시험이므로 안정도의 측정방법으로서는 전혀 맞지않다고 혹평하고 있다. 물론 마샬뿐 아니라 당시에 배합설계를 위한 시험법으로서 받아들여지고 있던 Hubbard-Field나 Hveem의 스테빌로미터 방법도 똑같이 비판의 대상이 되었다. McLeod의 반론의 근저에 있는 것은 각각의 시험방법의 근저에 역학적 근거가 없다고 하는 것이었다. 그에 의하면 아스팔트 혼합물의 안정도를 지배하는 것으로서 다음 8개 항목을 들고 있다.

- 재하면에 작용하는 횡방향의 지지력
- 포장두께
- 접지압 분포
- 점착력 및 내부마찰각에 미치는 재하속도의 영향
- 포장 표면과 타이어의 마찰저항
- 아스팔트층과 기층 간의 마찰저항
- 접지면에 있어 종횡단방향의 안정성

- 하중조건 (정지, 제동, 가속 등)

그리하여 경험적으로 발전된 세 가지 시험방법은 혼합물 자체의 안정성을 측정하고 있는 것 만으로 교통에 공용되었을 때의 안정성에 대하여서는 전혀 고려하지 않은 것이다. 위 반론은 큰 반응을 불러일으키게 되고, Ricketts에 의해 다음과 같은 두 가지 점에서 토의할 가치가 인정되어 장기에 걸친 연구가 이루어졌다.

- 3축시험에 의한 배합설계에 있어서 실험실 또는 현장에서 확인되어야 할 여러 가지 가정에 기초를 둔 Mohr의 포락원 등의 그림 또는 계산식에 대하여 재검토할 것.
- 현실로 이용되고 있는 시험기 및 시험방법, 특히 마샬, 빔, 하바드 필드 방법에서 부적절한 점 및 해석을 분명히 하고, 현장 기술자의 이해를 쉽게 할 것.

그리하여 토의의 목적을 다음과 같이 세 가지로 압축하였다.

- 3축시험에 기초를 둔 시험법으로 하기 전에 실험실과 실제의 공용성과의 관련성을 분명히 할것.
- 하바드 필드, 마샬 및 빔 방법의 신뢰성을 확인할 것.
- 가정조건에 기초를 두고 3축시험에서 얻어진 그림 또는 계산식을 이용하는 설계법의 기술적 가치.

이에 대하여 당시 3축시험에 기초를 둔 배합설계법의 개발을 목적으로 하여 워싱톤, 오레곤, 캘리포니아주 도로국이나 대학, 민간 기술자, 연구자 등으로 조직된 "3축연구회"를 중심으로 토의가 이루어져 다음 몇 가지에 다시 연구의 필요성이 제기되었다.

- 실제로 포설된 혼합물의 물리특성과 비교할 수 있도록 공시체의 제작방법을 개선할 것.
- 3축시험에 의해 배합설계된 혼합물의 특성과 공용성과의 상관관계에 대하여 검토할 것.
- 3축시험과 지금까지 이용되고 있는 시험과를 비교할 것.
- 현장기술자에 대하여도 이해될 수 있는 간단한 3축시험에 의한 설계법의 설명.

또한 하바드 필드 방법이나 빔 방법은 그 당시 이미 20여 년의 역사를 갖고 있고, 이 방법으로 배합설계된 혼합물에 의한 포장이 당시에도 양호한 공용성을 유지하고 있으므로 이 두 방법은 토의의 대상에서 제외하고 마샬방법에 대하여만 McLeod의 오해 또는 그의 의견에 대한 반론이 이루어졌다.

1951년에는 Goets에 의해 조립도, 밀입도, 시이트 아스팔트 혼합물을 대상으로 3축과 마샬시험을 비교하였다. 그는 결론으로서 마샬시험은 3축시험과 똑 같이 혼합물의 일반적인 질적 평가를 나타내는 것이면서도 3축시험은 혼합물의 평가를 위한 연구수단으로서 유용하며, 한편으로 마샬시험은 배합설계 또는 품질관리에 맞다고 하였다.

Endersby는 다짐방법이 마샬, 빔, 하바드 필드 및 1축압축(ASTM) 시험결과에 미치는 영향에 대하여 연구하여 각각의 시험을 비교하였다. 그는 어떠한 시험방법에 의해서도 공시체의 제작방법에 따라 시험결과에 차이가 생기는 것에 주의를 촉구하고, 통상적인 다짐방법 보다는 니딩에 의한 다짐방법이 각각의 시험결과의 차이를 어느 정도 줄일 수 있다고 하여 각각의 시험결과는 혼합물이 가지고 있는 어느 성질을 나타내는 것이므로 최종적으로는 현장의 공용상황과 비교하여 판단하여야 할 것이라고 하였다.

또한 Goets는 1축압축시험과 마샬시험을 비교하여 마샬시험은 일종의 측방구속을 받는 시험이라고 결론짓고 3축시험에 있어서 구속압을 0.7kg/㎠로 한

경우에 개략적으로 같은 아스팔트량이 얻어진다고 하였다. 다시 1953년에 들어서 Campen 등에 의해 네브라스카주 오마하 시험소에서 마샬법에 의한 배합설계법이 비교검토되어 그의 신뢰성이 높게 평가되고 있다.

그 후 마샬방법으로 다져진 공시체와 공용후 포장에서 절취한 공시체와를 비교하거나 통계적으로 처리된 데이터로부터 그의 편차를 논하거나 하여 그의 신뢰성이 확립되어 미국의 많은 주에서 마샬시험이 적용되게 된다. 1957년에 HRB의 조사에 의하면 49개 주 가운데 20개 주가 마샬시험에 의한 배합설계방법을 채택하고 있으며, 다른 설계방법에 의하여 시행하면서도 마샬시험을 보충적으로 취급하고 있는 주가 5개 주나 되고 있다.

표 5는 ASTM 및 AASHO에 아스팔트 혼합물의 시험방법으로서 규격화된 것이다. 여기에서도 알 수 있는 바와 같이 혼합물의 시험법이 규격화된 것은 제2차대전 이후의 일이며, 혼합물의 설계법으로서 크게 거론된 3축시험은 한 때 아스팔트협회의 설계법 또는 스미스의 3축시험에 의한 설계법으로 소개된 바 있으나 그 후 쇠퇴하고 경험에서 생겨 발전된 하바드 필드방법이 1952년에, 빔방법이 1965년에, 또한 마샬방법이 1965년에 각각 표준시험방법으로 규격화되었다. 각각 제안된 지로부터 20~30년이 지난 후의 일이다.

이상에서 알 수 있는 바와 같이 오래 전에 역학시험에 기초를 둔 배합설계에 노력을 기울였으나 이들의 대부분은 비현실적이거나 또는 실제의 공용성과의 확인이 불충분하여 더 이상 진전되지 못 하고, 나아가 재료역학에 기초를 둔 3축시험에 의한 방법도 시험법 자체가 복잡하다는 것과 이론과 실제 공용성과의 사이에 거리가 있다는 이유로 정착되지 못 하고, 경험에 뒷받침된 마샬시험, 빔의 스테빌로미터 및 코히죤미터시험 및 하바드 필드시험으로 집약되어 갔다.

표 5. 아스팔트 혼합물의 시험방법의 규격

시 험 방 법	ASTM			AASHTO		비 고
	규격 No.	적용 년도	제개정 년도	규격 No.	적용 년도	
시료채취	D979	1948	1951(개)	T168	1955	
압축시험	D1074	1949	1960(개)	T167	1960	
점착력에 미치는 물의 영향	D1075	1949	1954(개)	T165	1955	
하바드필드법에 의한 안정도시험	D1138	1950(잠)	1952(표)	T169	1955	제안
파라핀피복에 의한 밀도측정	D1188	1951	1968(표)	T166	1960	1920
마샬법에 의한 안정도시험	D1559	1958	1965(표)	—	—	
빔법에 의한 안정도시험	D1560	1958	1965(표)	—	—	제안
니딩콤팩터에 의한 공시체 제작	D1561	1958	1965(표)	—	—	1943
혼합물의 박리	D1664	1959	1969(표)	T182	1957	제안
혼합물의 최대비중	D2041	1964	1969(표)	T209	1964	1935
표건상태의 밀도	D2726	1968(잠)	1971(표)	—	—	
혼합물의 공극 측정	D3203	1973		—		

주) (개) : 개정 (잠) : 잠정규격 (표) : 표준규격

6.2 마샬 안정도시험

마샬시험에 의한 아스팔트 혼합물의 배합설계에 관한 개념은 미시시피주의 도로기술자였던 B. G. Marshall에 의해 고안된 것이다. 오늘날에는 세계 각국에서 이용되고 있는 이 시험방법은 1943년부터 1945년에 걸쳐 미국육군공병대에 의해 발전되고, 시험방법도 개선된 것으로 세계적으로 유명한 CBR 설계법과 함께 막대한 시험을 거쳐 발전된 시험법이다. 육군공병대에 의해 발전된 이 설계법은 최대치수 25mm 이하의 가열 아스팔트 혼합물에만 적용되는 것이며, 실험실에서 배합설계와 동시에 현장에서 시공관리에도 적용되는 것으로 되어 있다.

1958년에는 ASTM에도 채택되고 그 후 1960년과 1962년에 개정되고 1965년에 표준시험방법으로 규정되기에 이른다. 알려진 바와 같이 마샬안정도 시험결과로부터 최적 아스팔트량을 구하는 데에는 안정도, 흐름치뿐 아니라 혼합물의 물리적 성질도 파악되고, 각각에 대하여 어느 기준치를 만족하도록 할 필요가 있다. 이 기준치는 각각의 기관이 환경조건이나 교통조건에 따라 시험에서 정한 것으로 주된 것은 표 6과 같다.

1949년에 발표된 미 육군공병대의 기준치는 항공기 하중을 고려하여 3,500회 주행시험을 실시한 대규모의 시험포장에서 얻어진 것으로 그 후 각 기관 기준치의 근본이 된 것이다. 1943년부터 시작된 이 시험은 항공기의 기어(gear) 하중 7.5t, 18t, 30t에 상당하는 하중을 자주식 스크레퍼에 주고 포장의 공용성을 관찰하는 동시에 각종 실내시험을 실시하였다. 이들 혼합물의 배합은 현재 우리가 사용하는 밀입도 아스팔트 혼합물에 가까운 것이었다.

이 시험포장은 어디까지나 공항포장용의 기준을 작성하기 위한 것으로 직접 도로용으로 이용하는 데에는 문제가 있다고도 할 수 있는 일이었다. 결국 1951년에 미 육군공병대의 메뉴얼에서는 자동차를 의식하여 타이어 공기압에 따라 기준치를 표 6과 같이 변경하고 있다.

표 6. 마샬시험에 대한 기준치

분류 / 시험항목	미국공병대 (1951)		미국아스팔트협회 (1957)		
	타이어압 7kg/㎠	타이어압 14kg/㎠	重교통	中교통	輕교통
다짐횟수 (회)	50	75	75	50	35
안정도 (kg)	250이상	500이상	350이상	250이상	250이상
흐름치 (0.01㎝)	50이하	40이하	20~40	20~45	20~50
공극률 (%)	표층 3~5 기층 4~6	표층 4~6 기층 5~7	표층 3~5 기층 3~8	표층 3~5 기층 3~8	표층 3~5 기층 3~8
포화도 (%)	표층 75~85 기층 65~75	표층 75~82 기층 65~72	표층 75~82 기층 65~72	표층 75~85 기층 65~75	표층 75~85 기층 65~75

또한 미국아스팔트협회의 기준치는 각 주의 기준치를 참고하여 결정한 것으로 교통량에 따라 분류하였다.

1960년 이후에는 마샬시험에 관한 연구는 그다지 눈에 띄지 않고, AASHO도로시험의 영향도 있었지만 혼합물에 관한 연구는 오히려 동하중 조건하에서의 피로, 저온에서의 파괴, 크리프 또는 응력완화에 의한 혼합물의 레올로지(rheology)에 관한 연구가 주류를 차지하게 된다. 그 가운데 1962년의 Vockac의 연구는 마샬안정도의 재현성을 통계적으로 검증한 것으로 재료, 시험기구, 시험일시 등의 변동인자를 고려하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 오차는 적어 표준편차의 1/2~1/5이며, 표준오차도 ±5kg이다.
- 관리한계의 설정이 가능하다.
- 과거에 마샬시험은 정밀도가 나쁘다고 생각되었으나, 그것은 시험방법에 기인한 것이 아니고 혼합물, 시험기, 시험기술에 의한 것으로 마샬시험 자체는 정밀도가 적당히 좋은 것이다.
- 재현성에 대하여도 문제가 없고, 과거에 거론되던 바와 같이 70~140kg의 오차라고 하는 것은 잘못된 것으로 표준오차는 20kg 내외이다.

Vockac은 1932년 AAPT의 논문집에 밀입도 형태의 저가(low cost)도로의 배합에 대하여 발표한 이래 1962년에 이르기까지 30년간 실험에 연대하여 현장에서 경험을 쌓은 기술자이다. 우리나라에서도 마샬안정도의 변동이 160kg 정도나 되어 정밀도에 의문을 가질 때도 있으나 위 결론이 의미하는 바를 한번은 음미할 가치가 있을 것이다.

7. 제2차 대전후의 시공기계

제2차 세계대전은 대량의 포장을 급속하게 시공하는 것을 필요로 하게 되었다. 이것이 바버그린사의 연속혼합의 플랜트로 되고, 피니셔의 개량을 촉진하였다. 종래의 저가포장의 건설이 급격히 줄어들고, 이른바 고급포장이 증가하게 된 것도

전쟁의 영향이며, 대전후의 특징이라고 말할 수 있다. 결국 차량의 대형화와 고급화가 보다 고급의 포장을 필요로 하게 되었다. 한 예로 미국에서 1950년의 가열 아스팔트 혼합물의 출하량이 연간 5,000만톤이었던 것이 1959년에는 연간 1억 5,000만톤에 달하였다.

이와 같은 증가에는 1953년에 완성된 포터블형의 250t/h의 대형플랜트의 출현에 있다. 이와 같은 대형플랜트가 가능하게된 데에는 버너의 자동제어를 포함하여 골재건조시스템의 기술혁신은 물론이고, 체나 퍼그밀믹서의 개량이 이루어졌기 때문이며, 1954년경에 여러 제조회사에 의해 자동계량 사이클시스템이 개발되었기 때문이다. 1961년에는 500t/h를 넘는 용량의 연속식 플랜트도 출현한다. 당시 이미 이러한 형식에 있어서도 콜드피더의 관리가 완전히 이루어지게 되고, 체를 필요로 하지 않는 구조까지 발전하고 품질관리와 캘리브레이션을 위해 자동시료채취장치가 설치되고 품질증명을 위한 자동기록장치도 설치되게 된다. 아스팔트 플랜트에 대한 진보의 하나에 드럼믹서를 들 수 있다. 이 방식은 이미 1910년대에 고려되었던 것으로 1920년대에 쇠퇴하였던 것이 1950년대에 유화 아스팔트와의 혼합에 이용되었던 기회에 재등장하여 1960년대에 가열혼합용으로 개발되게 된 것이다.

집진시설에 대하여는 2차 대전중까지 겨우 사이클론 정도이었으나 1950년대가 되어 벤츄리형의 습식집진장치가 이용되게 된다. 또한 일부 도시지역에서는 섬유필터를 이용한 건식의 것도 이용되기 시작하였다. 1960년대에 이르러 환경오염방지라고 하는 전제하에서 채집된 세립분을 재이용하는 건식의 것이 주류를 차지하게 된다.

1910~1920년대에 이용되어오던 gob box(가열혼합물의 저장탱크)가 서어지빈(surge bin)으로 명칭이 바뀌어 미국의 서부지역에 재현된 것도 1950년대이었다. 이 가열저장도 시대에 따라 대형화되고, 혼합물의 종류별로 서어지빈을 설치하게 되었다. 서어지빈을 설치하는 주된 이유는 혼합물의 제조비용의 저감, 트럭비용의 절감 등 경제적인 이유 외에 한 종류의 혼합물을 연속운전함으로서 품질관리가 용이하고 균일한 혼합물의 제조가 가능했기 때문이다.

초기에는 비교적 단시간의 저장을 목적으로 하였으나 플로리다주 등에서 가열장치를 갖춘 저장빈을 보조적으로 배치하고 필요에 따라 출하하는 장시간 저장도 1960년대에 시도되었다. 장시간 저장에서의 아스팔트의 열화(aging)문제는 플로리다주 도로국에서는 그다지 문제가 되지않는다고 하는 한편, 불활성 가스를 저장빈중에 공급하여 아스팔트의 산화방지도 시도되게 된다.

거푸집을 필요로 하지않는 피니셔는 모두 플로팅 스크리드(floating screed)를 갖게 되고 포설폭원도 스크류 컨베이어를 이용한 스프레더(spreader)의 채용으로 증가하고, 포설속도도 일단으로 개선되기에 이르렀다. 1957년에는 바버그린사에서 유압(油壓)에 의한 자동변속 주행장치를 탑재한 피니셔가 개발되고 있으나 일반화되기까지는 그 후 10년후의 일이다. 스크리드의 자동제어장치가 등장한 것도 1950년대 후반이며, 1958년에는 R. P. Shea에 의해 횡단구배의 자동제어장치가 개발되어 1960년대 이후의 피니셔에 부착되게 된다.

다짐에 관한 1950년대의 획기적인 것은 가열혼합물의 다짐에 자주식의 타이어 롤러를 이용하기 시작한 것이다. 특히 1950년대 후반이 되어 타이어압을 변화시키는 장치도 등장하여 다짐효과를 더욱 높힐 수 있게 된다. 1940년대까지는 많은 경우 횡단방향 또는 대각선방향의 다짐이 의무적인 경우가 많았으나 프로팅 스크리드형의 피니셔의 등장으로 다짐은 오늘날과 같이 종단방향으로만 하게 되었다.

유압에 의한 주행장치가 롤러에 탑재된 것은

1961년의 일이며, 1970년대로 되어 롤러구동의 주류를 차지하게 된다. 이 방식의 채용으로 발진정지, 가속감속이 보다 완만하게 되고, 평탄성의 향상에 이바지하게 되었다. 오늘날 많이 쓰이고 있는 진동 롤러가 일반화된 것도 1960년대이며, 다시 1960년대 후반에는 진동기능을 갖춘 철윤롤러와 타이어 롤러가 조합된 다짐장비도 등장한다.

8. 혼합물의 역학적 성질에 관한 연구

1950년대 후반에 들어와 아스팔트포장의 구조설계에 맞추어 아스팔트 혼합물의 역학적 성질에 관한 연구가 활발하게 이루어진다. 결국 합리적인 포장구조로 하기 위해서는 아스팔트 혼합물의 하중에 대한 해석을 분명히 해둘 필요가 생겼기 때문이다. 이와 같은 연구에 앞서 포장의 파손을 원인별로 분류하고 그 인과관계로부터 대응책을 검토하였다. 포장파손을 최초로 분류한 것은 1924년 Hubbard이라 해도 좋을 것이다. 그는 포장의 파손을 간단하게 균열과 밀림(shoving)의 두 가지로 나누었다.

그 후 1955년 Ballerga는 본격적인 파손형태와 원인에 관한 분류도를 제안하고 세부에 걸친 파손원인을 기술하였다. 1962년이 되어 Hveem은 최근의 파손분류를 체계화하여 발표하였다. 또한 최근에는 1972년 Monismith에 의해 그림 2와 같은 매우 간략화된 형식으로 나타내기에 이른다. 다시 1976년에 Matsuno(松野, 일본)는 파손의 분류와 원인을 그림 3과 같이 제시하였다. 이러한 파손원인으로부터 아스팔트 혼합물에는 다음과 같은 여러 특성이 필요한 것으로 된다.

- 안정성
- 가요성(flexibility)
- 미끄럼저항성
- 파단(인장)강도
- 내구성
- 피로저항성
- 투수성 또는 불투수성

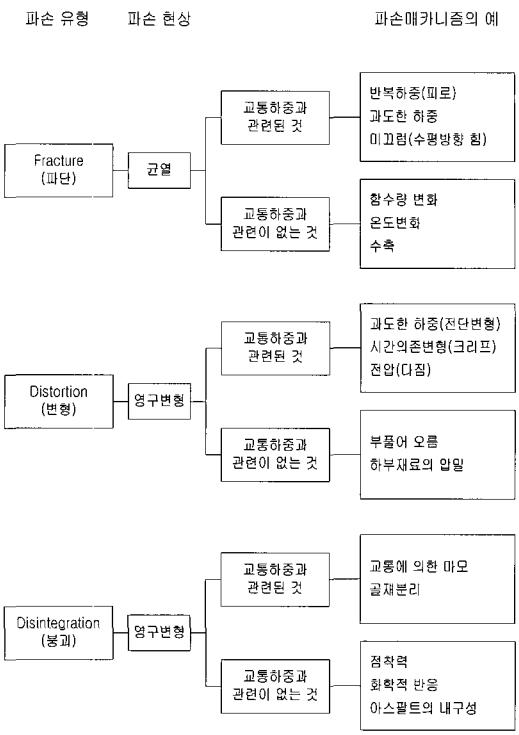

그림 2. 아스팔트포장에 관한 파손의 분류

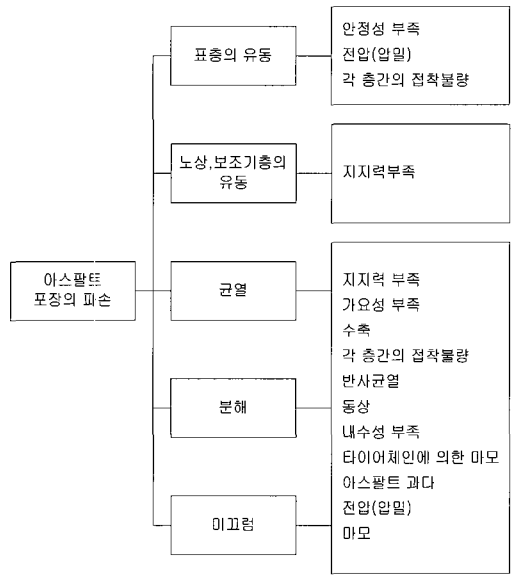

그림 3. 아스팔트포장의 파손의 분류

이들 가운데 안정성은 특별히 고려할 특성으로 오래된 것으로는 1924년 MacNauhton에 의해, 또한 1958년에는 Hveem 등에 의해 그림 4와 같이 안정성에 영향하는 요인이 요약되게 된다. 따라서 오래 전부터 개념적으로 쓰이고 있던 안정성 또는 가요성 등을 보다 합리적으로 표현하고자 하는 시도가 이루어진 것이다.

1954년 Van der Poel은 온도와 재하시간에 의해 다르게 변형거동하는 아스팔트와 아스팔트 혼합물에 대하여 "스티프니스(stiffness)"의 개념을 도입하고, 아스팔트의 스티프니스는 그의 물리적 특성(침입도, 연화점, PI)와 재하시간 및 온도에 의해 결정되고, 아스팔트 혼합물의 스티프니스는 아스팔트의 스티프니스와 골재용적률에 의해 정해진다고 주장하였다. 나아가 이 제안은 10년후인 1964년 Heukelom과 Klomp에 의해 상세히 검토되고, Monismith를 비롯한 많은 연구자에 의해 확인되어 오늘날의 아스팔트 혼합물의 스티프니스 결정법(Shell법)으로 확립되게 되었다.

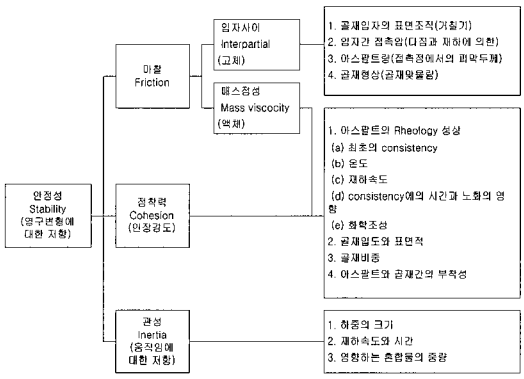

그림 4. Hveem과 Vallerga에 의한 안정성에 영향을 미치는 요소

한편으로는 크리프(Creep), 응력완화, 변형(Strain) 또는 동적재하시험 등에 의해 온도, 재하시간을 고려한 상태에서 직접응력과 변형의 관계를 구하는 방법의 도입도 적극적으로 시행되었다. 당시에 혼합물의 응력변형특성에 관한 연구자로는 Secor와 Monismith, Deacon, Pagen, Krokosky 등이 있다.

교통하중에 의해 반복되는 미소한 변형을 받아 아스팔트 혼합물은 파손된다. 이것이 이른바 피로파괴이며, 장시간에 걸친 노상, 보조기층의 변형에 추종하는 능력과 같이 "가요성(flexibility)에 의한 변형"으로 표현되는 것이다. 아스팔트 혼합물의 피로특성을 포장의 구조설계면에서 지적한 것은 Hveem과 Carmany이며, 1948년의 일이다.

나아가 1955년 Hveem은 변형과 피로파괴의 관계에 대하여 조사하고 양호한 공용성을 유지하기 위한 한계 변형을 표 7과 같이 제안하고 있다. 이 연구는 그 후 벤켈만빔으로 유명한 A. C. Benkelman 등 많은 연구자에 의해 변형량에 관한 연구로 이어졌다.

표 7. 한계 변형량 (Hveem, 1955)

포장두께 (cm)	포장 형식	한계변형량 (mm)
15	시멘트처리 기층 위의 아스팔트 포장	0.30
10	아스팔트 콘크리트	0.43
7.5	자갈 기층 위의 아스팔트 포장	0.51
5	자갈 기층 위의 아스팔트 포장	0.64
2.5	자갈 기층 위의 노상혼합포장	0.91

또한 1954년에는 Nijboer에 의해 실내에서 최초로 피로시험이 시행되고 있다. 그는 시이트 아스팔트 혼합물의 배합, 특히 필러 아스팔트비에 의해 피로파괴응력에 차이가 생기는 것을 밝혀냈다. 그 후 1958년부터 1962년에 걸친 Pell, Monismith 등의 연구로 혼합물의 재료와 배합 및 시험온도 등과 피로특성의 관련성이 밝혀지게 되었다.

이와 같이 아스팔트 혼합물의 피로특성은 포장구조설계에 빼놓을 수 없는 정보이며, 포장의 수명예측과도 관계가 있는 것이므로 1960년 이후 급속하게 주목되기에 이른다. 그 후 AASHO 도로시험을 비롯하여 각지에서 시험포장이 이루어져 설계수명

을 고려한 아스팔트 혼합물의 한계변형이 제안되게 된다.

아스팔트 혼합물의 변형해석에 관한 연구와 함께 아스팔트 및 아스팔트 혼합물의 파괴강도에 관한 연구도 많은 연구자에 의해 진행된다. 혼합물에 관해서는 Van der Poel에 의해 1954년에 시이트 아스팔트가 저온에서 인장강도가 50kg/㎠ 정도에서 일정하다고 제창되는 동시에 Ericksson은 온도·파괴강도관계에 있어 최대치가 존재함을 밝혔다.

이들 성과는 그 후 Tons, Heukelom과 Klomp, Monismth 등에 의해 혼합물의 종류, 시험조건 등 여러 가지 조건에서 검증되고, 고속재하 또는 저온조건이면 혼합물의 파괴강도는 40~100kg/㎠ 정도이고, 파단시의 변형량은 $1,000 \sim 1,200 \times 10^{-6}$ 정도인 것이 확인되었다. 이러한 연구는 오늘날 파단시의 응력, 변형, 시간을 고려한 파괴포락면으로의 연구로 진전되고, 복잡한 파괴현상의 해명에 노력을 기울이고 있다.

9. 맺음말

락 아스팔트의 발견과 이용으로 시작된 아스팔트 포장은 1850년대부터 약 30년간 구미 각지에서 건설되었다. 그러나 트리니데드섬의 레이크 아스팔트의 이용가치가 19세기 말의 석유잔사유의 이용가치와 함께 확인되면서 락 아스팔트는 서서히 사용이 감소하게 되고 20세기 초 석유 아스팔트가 생산되기까지 레이크 아스팔트의 시대가 이어지게 된다.

락 아스팔트의 시대는 그것을 잘게 부수어 만들어지던 포장도 레이크 아스팔트의 시대로 되어서는 인위적으로 골재를 배합하고 또한 아스팔트의 첨가가 필요하게 되면서 오늘날 말하는 아스팔트 혼합물의 배합설계가 이루어지게 되었다.

이와 같은 상황에서 19세기 말 Richardson의 표준입도가 생긴다. 그는 아스팔트 혼합물의 안정성은 골재의 표면적에 의해 지배된다고 한 최초의 인물이며, 후에 표면적이론의 근본이라고 할 수 있다.

당시의 교통은 아직 철륜을 이끄는 마차교통이 주체이고, 오늘날의 시이트 아스팔트에 가까운 혼합물이었던 관계로 그 안정성에 많은 문제가 있었다. 이와 같은 상황에서 어느 정도 강성(剛性)을 가지며 안정성이 우수한 "Bitulithic" 이라고 부르는 특허포장을 개발한 것이 Warren이며, 1901년의 일이다. 그는 혼합물이 안정되기 위해서는 최대밀도, 최소공극이어야 한다고 주장한 인물이며, 후일에 공극이론의 원점이라고 해도 좋을 것이다.

1920년대가 되어 캘리포니아 또는 멕시코산의 석유 아스팔트의 시대로 되고, 레이크 아스팔트는 그 자취를 감춘다. 또한 동시에 자동차교통의 시대를 맞이하게 되기도 하여 포장도 시이트 아스팔트에서 서서히 아스팔트 콘크리트로 옮겨진다. 여기에 박차를 가한 것이 Warren회사의 토페카시(Topeka市)에 대한 특허침해소송의 패소이었다. 결국 1/2인치 이하의 굵은골재가 혼합된 이른바 토페카포장의 출현이었다. 이것과 동시에 시험기구를 사용하여 각종 역학시험을 실시하여 혼합물의 안정성을 측정하려고 하는 시도가 늘어나게 된다. 오늘날 남아있는 Hubbard-Field의 안정도시험이 한 예이다.

1930년대로 되어 혼합물의 가요성을 확보하기 위한 아스팔트량의 중요성이 지적되고, 동시에 최대밀도, 최소공극률과 아스팔트량의 관계가 골재간극률(VMA)로부터 검토되기 시작하였다. 즉 가요성이 많으면서 안정성이 높은 혼합물로 만들기 위해서는 골재간극률에 최소한계가 존재한다는 것이 알려지게 된다. 이러한 생각을 최초로 주장한 것은 Johannson이며, 1933년의 일이었다.

앞서 말한 Richardson과 Warren은 각각 다른 학설에서 혼합물의 배합설계를 제창하였다. 즉 전자는 골재표면적과 최적 아스팔트 피막두께의 곱이 최적 아스팔트량이라는 개념이고, 후자는 골재가 최대밀도, 최소공극이어야 할 필요성의 주장이다.

그러나 어느 주장에 있어서나 실제로 혼합물을 배합하는 데에는 안정성의 저하와 블리이딩을 피하

기 위하여 혼합물중에 약간의 공극을 남겨 두어야 하는 것이 경험적으로 알려 졌다. 따라서 밀입도 혼합물이면 어느 방법에 의하거나 같은 혼합물이 설계되게 된다.

결국 전자의 경우 골재표면적과 최적 아스팔트 피막두께와의 곱 및 공극의 두 가지로부터 판단하여 최적 아스팔트량을 결정하고, 후자의 경우는 최대밀도에서 골재간극률 및 공극률의 두 가지로 판단하여 최적 아스팔트량을 결정하는 것이 되며, 어느 경우나 경험이 무엇보다 중요하였다.

한편 1920년대로부터 1930년대에 걸쳐 자동차교통의 급격한 증가에 대처하기 위해 미국 서부를 중심으로 도로유(road oil) 또는 액체 아스팔트에 의한 노상혼합, 오늘날의 저가포장의 건설이 성행하게 되었다. 이 경우에 문제로 되는 것이 살포하여야 할 오일의 양 또는 아스팔트량이었다. 여기에서 성공한 포장 또는 실패한 포장의 조사연구로부터 가장 간단한 방법으로 생각된 것이 현장에서 혼합하는 재료의 입도와 오일의 양 또는 아스팔트량과의 관계를 분명히 하는 것이었다.

이 관계를 최초로 밝힌 것이 McKesson과 Frickstadt이다. 이러한 생각이 Richardson이 주장한 표면적이론과 결부되어 오늘날 캘리포니아주의 CKE(원심석유당량)법에 의한 최적 아스팔트량의 결정법이 생기게 되었다.

또한 이 시대는 많은 실내시험 또는 시뮬레이션 시험이 제안되어 공용중인 포장조사와의 비교나 혼합물의 배합과 공용성과의 관련성이 검토된 시대이기도 하다. 결국 1920년대까지의 경험을 정량화하려는 노력을 기울였다는 것이다. 오늘날에도 알려져있는 것으로 하바드 필드시험(1925), Hveem의 스테빌로미터시험 및 코히숀미터시험(1935) 등이 있다.

1940년대로 되면 재료역학에 기초를 둔 설계법이 대두된다. 즉 Mohr의 파괴이론에 근거를 둔 3축시험에 의한 배합설계법이다. 오늘날에는 그중 하나가 Smith의 3축시험으로 알려져있으나 최초의 제안은 Endersby에 의한 것이며 당시 미국아스팔트협회의 설계법으로 채택되었다.

이와 같은 역학시험에 기초를 둔 설계법은 이미 개발되어있던 Hubbard-Field나 Hveem의 설계법의 재확인에 도움이 되는 동시에 미국육군공병대에서 많은 실험으로 뒷받침된 마샬시험으로 발전되었다.

1950년대가 되면서 역학시험에 의한 배합설계법이 완전히 정착하여 미국에서는 각주에서 여러 가지 방법으로 배합설계를 시행하게 되나 마샬시험에 의하거나 또는 마샬시험을 보조적으로 이용하여 배합설계를 시행하는 주가 미국의 49개 주 가운데 25개 주에 달하게 된다.

그러나 그의 밑바탕에는 공극량과 골재간극을 메우는 아스팔트량, 즉 오늘날 말하는 포화도에 경험적인 기준을 설정하여 최종적으로 아스팔트량을 결정하게 된 것이다. 또한 이 시대는 과거에 정착되어있던 시험방법과 3축시험과의 비교가 활발히 이루어져 실제로 포설된 혼합물과 실내에서 제작된 공시체 혼합물의 비교, 즉 배합설계에서 가장 중요한 다짐에 많은 연구자가 주목한 시대이기도 하다. 전자는 3축시험의 번잡성에 대하여 마샬시험의 간편성과 타당성을 부각시키고, 후자는 니이딩 콤팩터나 쟈이레터리 콤팩터의 진전으로 이어진다. 1960년대 이후로 되면서 아스팔트 혼합물에 대한 연구의 중심은 배합설계로부터 혼합물의 역학적 성질, 특히 레올로지에 관한 연구가 중심이 된다. 그 가운데 영국은 하트롤드 아스팔트 (Hot-rolled asphalt)의 배합설계 방법을 전면적으로 개정한다.

현재에도 포장에 관한 많은 연구와 발전이 이어지고 있다. 오늘날의 보편적인 기술도 많은 연구자와 기술자에 의해 대단한 노력과 고생으로 다듬어진 것을 알 수 있다. 이 글이 우리 기술자의 기술 향상에 도움이 된다면 다행으로 생각한다.