

목 차

■ 기술자료	■ 공동주택 소음실태 및 저감대책(I)	전남대 건축공학과	1
		교수 김선우	
	■ 말뚝기초의 내진설계	기술연구소 김호비	16
	■ 흙 인성 시험	기술연구소 김덕성	29
	■ 암반공학 이야기(II)	토목설계팀 이정완	42
■ 시공사례	■ 인천국제공항 여객터미널 Lift-up공법 적용사례	이만영	54
		윤순응	
■ 기술단신	■ 암반공학 용어해설		68
	■ 대기측정장비 소개		75
	■ 소음/진동의 피해사례		76

共同住宅 騒音實態 및 低減對策 (I)

金 善 玟 / 전남대 건축공학과 교수

1. 서 론

인구의 도시집중 현상은 심각한 주택부족 사태를 유발하였고 이를 해결하고 토지의 효율적 이용을 위하여 국내에서도 공동주택의 건설이 시작되었다. 대한주택공사가 1962년 서울 마포에 국내 최초의 아파트 단지를 건설한 이후 그 규모에 대한 대형화가 요구되고 1972년부터 공업화, 양산화의 체제로 돌입하게 됨에 따라 고층화 및 고밀도화가 필요하게 되었다. 따라서 1980년에는 월 슬래브(wall slab) 공법이 도입되는 등 구조계획에 대한 합리화 방안이 모색되었고, 또한 원가절감을 위하여 벽 및 바닥의 재료 두께는 얇아지고 경량화 된 재료를 채택하는 성향이 높아지고 있다. 이에 반하여 경제개발에 따른 국민소득 수준의 향상으로 가치관이 다양화되면서 생활의 질적 수준을 향상시키려는 욕구가 증대되고 있다.

즉 쾌적한 주거환경에 대한 욕구는 증대되는 데 반하여 공동주택에 사용되는 재료는 두께는 점점 얇아지고 경량화 되고 있으며 차량증가에 따른 외부 소음원(騒音原)과 주거설비의 수요증대에 기인한 내부 소음원 등은 증가하고 있는 실정이다.

이에 따라 외부소음 못지 않게 내부소음 또한 심각한 문제로 대두되고 있다. 이러한 현상은 1985년 대한주택공사가 앞으로의 아파트 구입 시 고려하여야 할 사항을 조사한 결과 현 아파트 구입 시에 비하여 가장 큰 변화율(약300%의 증가)을 보이는 항목이 소음이라는 점에서도 유추할 수 있다. 특히 이웃과 벽체(壁體) 및 바닥을 공유하여야 하는 공동주택의 특수성 때문에 이웃에서 발생하는 아이들 뛰노는 소리, 걷는 소리, 발자국 소리 등 바닥충격음 계통의 소음이 입주자의 불만을 유발하여 이제는 차음이 주거성능을 결정하는 가장 중요한 인자로 등장하게 되었다.

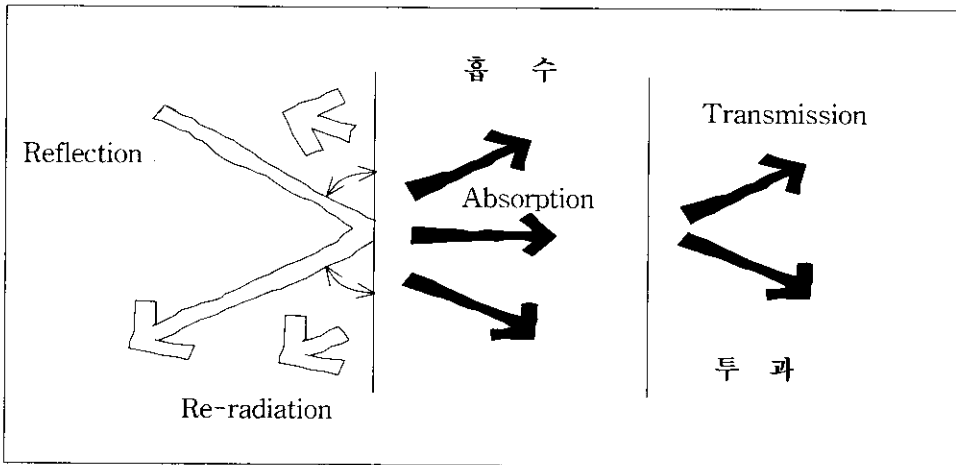
2.1.2 흡음과 차음

<그림 2-1>에서와 같이 음파가 어떤 재료의 표면에 입사하는 경우 일부는 반사되고 나머지는 흡수되거나 투과하게 된다. 이 때 재료에 입사하는 음 에너지를 I, 반사되는 음 에너지를 R, 흡수되는 음 에너지를 A, 나머지 투과되는 음 에너지를 T라 하면 다음과 같은 식이 정립된다.

$$I = R + A + T$$

위 관계식에서 흡음률 α 는 다음 식으로 정의된다.

$$\alpha = 1 - \frac{R}{I} = \frac{A + T}{I}$$



<그림 2-1> 소리의 반사, 흡수 및 투과

위 식에서 알 수 있듯이 완전 반사면에서는 반사하는 음 에너지와 입사하는 음 에너지가 같기 때문에, 즉 $R = I$ 이 되어 $\alpha = 0$ 으로 되고, 완전 흡음면에서는 반사되는 음 에너지 R이 0이 되기 때문에 $\alpha = 1$ 로 된다. 또한 재료가 지닌 흡음(吸音)효과는 주파수별 흡음률로 표시하고 그 흡음률은 0~1의 범위로서 이 값이 클수록 흡음 효과는 커진다.

이러한 흡음률은 그 재료 자체의 물성뿐만 아니라 같은 재료라 해도 두께와 배후 공기층, 표면상태, 재료의 시공조건, 입사음의 주파수와 입사각도 등에 따라 그 값이 변화되기 때문에 재료의 흡음률을 말할 때는 이러한 조건을 명확히 해 둘 필요가 있다.

한편 재료가 지닌 차음성능은 음 에너지의 투과율과 투과손실로 표시된다. 투과에너지의 입사에너지에 대한 비율을 투과율(Transmission co-efficient)이라 하며 투과율 τ 는 다음 식으로 정의한다.

$$\tau = \frac{T}{I}$$

투과율의 역수를 데시벨 단위로 나타낸 값을 투과손실(TL : Transmission loss)이라 하며 다음 식으로 표시한다.

$$TL = 10 \log_{10} \frac{1}{\tau} = 10 \log_{10} \frac{I}{T}$$

이상과 같이 흡음과 차음은 서로 다른 의미가 있기 때문에 그 의미를 정확히 숙지한 후 사용해야 한다.

2.2 공동주택 소음원의 종류와 변화추이

2.2.1 일본

일본 건설성에서 1979년, 1980년에 수도권과 近畿圏에서 분양된 맨션 거주자 1445명에 대해 앙케이트 조사 결과 이웃집 상하 층의 차음, 외부에 대한 방음에 대해 불만을 나타낸 사람이 30% 전후이고, 거주자가 “카탈로그에 가장 상세히 표시하는 쪽이 좋다.”라고 생각하는 항목은 [표 2-1]과 같이 나타났다.

이것을 보면 위층 세대에서 발생하는 어린이의 뒹, 달리는 행위 등의 바닥충격음에 대한 차음성능을 지적한 사람이 70%이상의 비율로써 1위를 점해, 스스로가 거주한 경험에서 상층세대의 바닥충격음에 대한 차단성능이 어느 정도의 레벨인가를 구입 전에 알고 싶어하는 바램이 명확히 나타나고 있다. 이는 일면으로는 지금까지 지어진 공동주택의 바닥충격음 차단성능이 주민에게 불만족한 점이 많음을 의미한다. 또한 같은 조사에 의하면 분양맨션의 “성능표시제도”에 대해 64.5%가 적극적으로 도입해야 한다고 말하고 있다.

이러한 일본에서의 차음실태에 관한 조사결과를 비교하면 [표 2-2]와 같다. 표에서 일본 공단임대의 경우 변소의 급배수음에 대한 지적율이 매우 높은 것은 배관을 실내로 노출시키고 구체를 직접 벽체 등에 접속시킴으로써 발생하는 고체전송음에 의한 결과이며, 급배수관을 슬래브(sleeve)를 사용하여 절연시키고 평면계획 배관공법 등에 의하여 고체전송음을 절감시킨 민간분양 및 공단분양의 경우에는 쿵쾅거리는 소리, 뛰어 다니는 소리 등 바닥충격음 계통의 소음이 가장 높은 지적율을 나타내고 있음을 알 수 있다. 즉 내부소음원 중 설비계통의 소음은 위생기구의 개량 및 배관공법 평면계획시의 고려 등에 의하여 그 지적율을 매우 감소시킬 수 있음을 알 수 있다. 그러나 바닥충격음 계통의 소음원에 대해서는 가장 높은 불만족을 나타내고 있다. 즉 분양아파트 입주자가 분양 카탈로그에 가장 상세히 표시하였으면 하는 것도 바닥충격음에 대한 차음성능의 표시이고, 거주자가

가장 많은 불만족을 표시하는 것도 바닥충격음 계통임을 알 수 있다.

[표 2-1] 일본 분양 맨션 입주자가 카탈로그 등에 보다
상세하게 명시하기를 바라는 항목

순 위	항 목	지 적 율
1	상하층간 충격음 차단성능	71.5%
2	일조시간	63.4%
3	내진상의 배려	59.7%
4	수선계획, 수선적립금	58.6%
5	주변의 상점, 시설 등의 상황	55.1%
6	내·외장재의 내화성능	52.8%
7	배수관의 막힘 대책	52.3%
8	내·외장재의 보수방법	50.7%
9	배관류의 보수점검방법	47.2%
10	설비 기기의 보수점검방법	44.9%
11	수납용량	43.0%
12	자전거 보관장소의 유무 및 개소	37.0%
13	피난방법	36.4%
14	개벽의 차음성능	36.3%
15	주차장의 유무 및 크기	27.7%

[표 2-2] 일본에서의 공동주택 내부 주요 소음원

구 분	日本住宅工團	日本 光田泰子			木村
	공동주택	공동임대 9단지	민간분양 5단지	공사분양 3단지	민간분양단지
1	변소의 급배수음 (46.9%)	변소의 급배수음 (41.6%)	쿵쾅거리는 소리 (35.4%)	쿵쾅거리는 소리 (22.4%)	쿵쾅거리는 소리 (25.0%)
2	욕실의 급배수음 (37.4%)	쿵쾅거리는 소리 (37.5%)	뛰어 다니는 소리 (24.0%)	뛰어다니는 소리 (20.0%)	뛰어다니는 소리 (21.8%)
3	쿵쾅거리는 소리 (35.4%)	뛰어 다니는 소리 (32.3%)	실내의 발소리 (17.1%)	변소의 급배수음 (14.1%)	변소의 급배수음 (17.6%)
4	부엌의 급배수음 (24.3%)	욕실의 급배수음 (31.4%)	변소의 급배수음 (16.0%)	현관문 개폐음 (12.9%)	실내의 발소리 (11.6%)
5	변소의 행위음 (22.5%)	부엌의 급배수음 (27.6%)	발코니에서의 소리 (14.3%)	이불 터는 소리 (12.9%)	가구, 의자의 소리 (10.6%)
6	실내발소리 (20.5%)	실내발소리 (19.2%)	가구, 의자의 소리 (9.4%)	실내발소리 (9.4%)	실내발소리 (9.6%)

[표 2-3] 조사 시기별 내부소음에 대한 지적율 순위

구분	1981년 4월 ¹⁾	1986년 ²⁾	1994년 ³⁾	1996년 ⁴⁾
1	계단발자국 소리 (67.5%)	아이들 뛰노는 소리 (46.7%)	아이들 뛰노는 소리 (51.1%)	아이들 뛰노는 소리 (58.4%)
2	변소의 급배수음 (63.9%)	욕조의 급배수음 (42.8%)	변기의 급배수음 (50.9%)	욕조의 급배수음 (49.6%)
3	부엌의 급배수음 (60.0%)	계단, 복도의 소리 (41.4%)	욕조의 급배수음 (49.7%)	변기의 급배수음 (49.5%)
4	쓰레기 버리는 소리 (58.2%)	변기의 급배수음 (38.6%)	엘리베이터 운행소음 (45.2%)	베란다 물내리는 소리 (39.5%)
5	현관문 개폐음 (54.3%)	현관문 개폐음 (32.9%)	베란다 물내리는 소리 (41.3%)	피아노 등 악기소리 (33.8%)
6	아이들 뛰노는 소리 (47.2%)	쓰레기 버리는 소리 (31.1%)	피아노 등 악기소리 (36.1%)	현관문 개폐음 (29.9%)

1) 반호용 : “아파트먼트 하우스의 내부소음에 대한 연구”, 대한건축학회지 25권 99호, 1981.4

2) 대한주택공사 : “공동주택의 내부소음기준설정에 관한 연구”, 1986.12

3) 김선우, 박주옥, 정광옥 : “주거환경소음에 대한 거주자의 반응 변화추이 고찰”, 한국소음진동학회 춘계학술발표대회, 1996.5

4) 박주옥 : “공동주택 주거환경소음에 대한 주민반응의 변화추이에 관한 조사 연구”, 전남대학교 대학원 석사학위논문, 1996.8

2.2.2 국내 공동주택 소음원의 종류와 변화추이

1) 주요 내부 소음원의 변화 (1980년대, 1990년대)

공동주택의 공급이 급증하기 이전에 실시된 1981년의 조사와 비교할 때, 1986년에서 1996년까지의 두드러진 특징으로는 바닥충격음 계통의 ‘아이들 뛰노는 소리’와 설비 기기류 소음인 ‘욕실 급배수음’과 ‘엘리베이터 운행소음’ 등이 높은 지적율을 보이고 있다.

[표 2-3]에서 ‘아이들 뛰노는 소리’는 지속적인 지적율의 증가를 보이고 있는데 이러한 결과는 공동주택의 고층화, 경량화에 따라 상층의 바닥충격음의 차단성능이 약화되었으며, 근년까지도 이러한 문제는 여전히 남아 있음을 보여주고 있다. 또한 급 배수 설비소음도 지적율의 순위 및 변화의 수준에서 바닥충격음과 유사한 형태를 보이고 있다. ‘94년과 ‘96년의 조사의 특징으로 ‘엘리베이터 운행소음’이 높은 지적율을 보이고 있는 것은 초고층 공동주택의 건축으로 인한 대용량 고속 엘리베이터 설비의 등장을 반영해주고 있다. 그러나 변화의 수준에서 ‘96년의 수준이 ‘94년에 비해 하향의 추이를 보이고 있는 것은 소음의 저감을 위한 노력이 어느 정도 이루어지고 있음을 나타내고 있는 것으로 보인다.

'81년과 '86년의 조사에서 상위에 나타난 '쓰레기 버리는 소리'가 분리 구성상의 이유로 더스트 슈트의 설치가 금지되고 있는 상태에서 '94년 이후의 조사에서 매우 낮은 지적율을 보이고 있으며, 변화의 수준에서도 '86년 조사와 그 이후의 것이 구분되고 있음이 특징적으로 나타나고 있다. 피아노 등의 악기음의 공기전달음 계통의 소음원으로서 이러한 소음이 '94년 이후 높은 순위에 나타나고 있고, 변화수준도 구분되고 있는 것은 공동주택의 고층화에 따른 구조체 및 벽체의 경량화에서 오는 공기음의 전달에 기인한 것으로 판단된다.

2) 낮과 밤의 시간대별 소음원(騒音原)의 특성

공동주택 내부소음의 발생은 낮과 밤의 시간대에 따라 발생소음의 종류와 그에 대한 피해가 달리 나타나는 경향이 있다.

낮시간에 문제시되는 소음으로는 '아이들 뛰노는 소리'가 가장 두드러지고 있으며, '배란다의 물 내려오는 소리'와 '초인종 소리' 등의 순으로 나타나고 있다. 밤시간에는 '변기 급배수 소리'가 가장 높고, 다음이 '아이들 뛰노는 소리' 그리고 '엘리베이터 운행소리'와 '욕실 급 배수음'의 순위를 보이고 있다.

이는 공동주택의 문제소음이 여전히 낮 시간에는 바닥충격음 계통의 소음 그리고 밤 시간대에는 설비 기기류 소음인 것을 나타내는 것이다.

3) 주요 소음 발생원 조사 (어린이 유무)

가) 위층 어린이 유무별 소음인지도 차이

앞에서 기술한 바와 같이 공동주택의 내부 소음 중 가장 많은 지적율을 보이고 있을 뿐만 아니라 주위의 암소음이 다소 큰 낮 시간대에도 충격력이 커 인접 세대에 강한 불만족을 유발하는 대표적인 소음원은 바로 아이들의 놀이형태에 관련된 소음원이라고 할 수 있다. 결국 거주자들이 느끼는 위층 소음에 대한 인지도의 차이는 위층에 아이들이 있느냐 없느냐에 따라 크게 달라지게 되며 이러한 요인들이 거주성능에 많은 영향을 미치게 되는 것은 말할 나위도 없다.

각 인지도에 대한 차이를 정량화하기 어려울 뿐만 아니라 인지도간에 높고 낮음 등의 순위를 부여해주는 서열척도(ordinal scale)를 사용하므로 각 구조별로 어린이 유무에 따른 인지도(신경 쓰임)와의 차이를 검증하기 위해 비모수 통계방법 중의 하나인 Mann-Whitney (U-test)검증을 사용하여 분석한 각 아파트 별 어린이 유무에 따른 소음인지도의 차이는 [표 2-4]와 같다. 표 2-4에서와 같이 두 아파트단지 모두 유의수준이 0.01이하로 나타나 위층의 어린이 유무에 따라 위층에서 들리는 소리에 대한 인지도에는 차이가 있음을 확

연히 보여주고 있다. 또한 위층세대의 어린이 놀이 행위로 대표할 수 있는 뛰는 소리의 위층 어린이 유무별 차이를 검증해 보면 [표 2-5]와 같다. 표에서도 구조별로 유의수준이 0.01이하로 나타나 위층 세대에 어린이의 유무에 따라 어린이 놀이 행위를 대표할 수 있는 뛰는 소리에 대한 인지도에 차이가 있음을 알 수 있다.

따라서 위층의 가족 구성원 중 특히 쿵쿵거리는 소리와 밀접한 관계가 있는 어린이의 유무에 따라 위층에서 발생하는 소음에 대한 인지도는 차이가 있음을 알 수 있으며, 거주자가 느끼는 주요발생 소음원이 어린이와 밀접하게 관련된 바닥충격음을 알 수 있다.

[표 2-4] 어린이 유무별 소음인지도 차이 검증

구 조	어린이 유무	Mean Rank	Case	U값	W값	유의수준
A 단지	있음	20.24	25	181	506	0.0002
	없음	35.84	32			
B 단지	있음	37.29	48	614	1,51	0.0075
	없음	51.34	38			

[표 2-5] 어린이 유무별 어린이 뛰는 소리에 대한 인지도 차이검증

구 조	어린이 유무	Mean Rank	Case	U값	W값	유의수준
A 단지	있음	37.22	25	194.5	930.5	0.0007
	없음	22.58	32			
B 단지	있음	50.76	48	563.3	1,304.5	0.0020
	없음	34.33	38			

나) 위층 소음발생 빈도와 인지도

위층에서의 각종 소음에 대해 ‘매우 신경 쓰임’이라고 한 그룹은 평상시 생활 상황에서 항상 문제의식을 가지고 있는 그룹이며, 발생횟수가 ‘자주’라고 지적인 그룹도 마찬가지로 위층세대의 반복적이고 다발적인 소음에 항상 노출되어 있는 그룹이라고 할 수 있다. 따라서 소음인지도를 ‘매우 신경 쓰임’이라고 지적인 그룹과 발생횟수를 ‘매우’라고 지적인 그룹이 가장 발생소음에 민감한 반응을 보이는 그룹에 대하여 두 아파트 단지를 대상으로 위층에 어린이가 있고 없음에 따라 위층에서 발생하는 각종 소음에 대한 인지도와 발

생회수를 비교해 보면 위층에 어린이가 있고 없음에 따라서 소음발생 빈도와 인지도는 많은 차이를 보이고 있으며, 특히 충격력이 커 가장 많은 불만을 나타내고 있을 뿐만 아니라 공동주택 내부 소음원 중 지적률이 높은 어린이의 뛰는 소리에 대한 발생빈도는 어린이 유무에 따라 아주 팔목할 만한 차이를 보이고 있다.

다) 피해의식

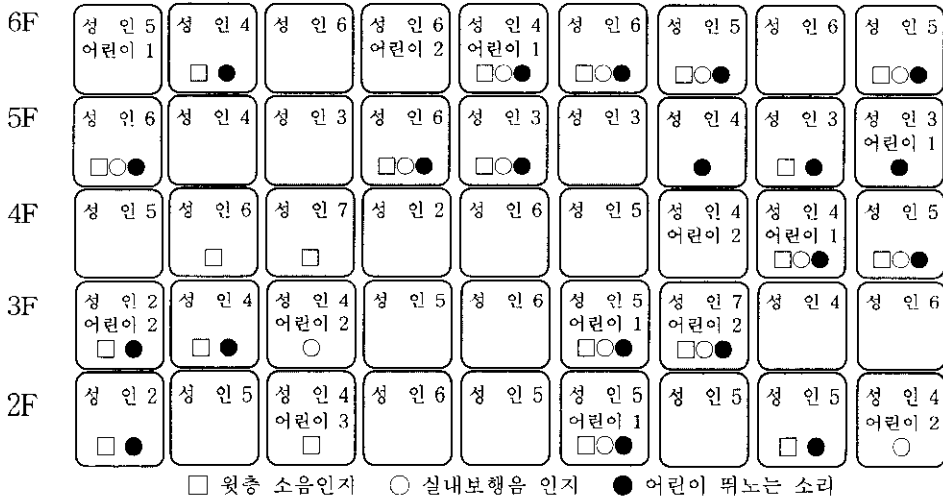
소음에 대한 시끄러움의 정도를 파악하는 방법 가운데 생활 중에 경험하게 되는 반응의 태도, 즉 피해의식을 묻는 항목을 설정함으로써 간접적인 차음성능을 판단할 수가 있다. 결과를 보면 상층에 어린이가 있음으로써 느끼는 피해정도도 어린이가 없는 경우에 비해 상당히 큼을 알 수 있다. 다만 “우리 집 소리가 이웃집에 들릴까 걱정된다.”라고 한 그룹은 아이들의 유무와는 별다른 차이를 보이지 않고 매우 높은 비율을 차지하고 있는 직,간접적인 생활의 경험에서 나오는 바닥의 차음성능 정도를 바탕으로 이웃에 대해 주의해야 한다는 의식으로서 대부분의 거주자가 느끼는 생활감으로 보인다. 상층의 어린이 유무에 따른 거주자의 현저한 인지도 차이를 감안할 때 바닥충격음의 차음성능 평가방안을 수립하거나 차음기준을 설정하기 위해서는 어린이의 행위와 관련된 충격음을 바탕으로 검토하여야 할 것으로 판단된다.

4) 주요 내부 소음원에 의한 평가방법

차음성능의 평가방법 설정을 위해서는 무엇보다도 주요 내부소음원을 추출하고 그 소음원의 음향적 특성과 전파특성을 파악하는 것이 중요하다. 같은 대상단지에서 각종 내부 소음원의 전파방향별 지적률(매우+꽤 신경 쓰인다)을 집계하고 이웃소음에 대한 인지도와 피어슨 상관계수를 산출하여 주요 내부소음원을 추출하면 [표 2-6]과 같다. 표에서처럼 옆집에서의 소음에 대해서는 구조 A에 대해서만 계단의 발걸음 소리와 현관음 개폐음이 20~30%의 지적율을 보여 계단실형 공동주택에서 발생하는 생활패턴을 대변하고 있을 뿐 그 이외의 공기전파음 계통에 대한 지적율은 매우 낮았다. 그러나 위층에서의 바닥충격음 계통은 그 지적율이 매우 높게 나타나고 있어 충격음에 대한 차음성능이 매우 저조함을 알 수 있다.

[표 2-6] 각종 내부소음원의 전파방향별 지적률

내부소음원	지적률		구조A		구조B		구조C		구조D		위층소음 인지도와의 상관계수
	윗집	옆집	윗집	옆집	윗집	옆집	윗집	옆집	윗집	옆집	
실내보행음	△		△		○		△	△			0.4593*,*
계간의 발걸음 소리	●	△			●						0.1378*,*
아이들 뛰노는 소리	●		◎				●				0.5198*,*
현관문 개폐음	○	△					△				0.1760*,*
창문. 방문개폐음	△										0.2111*,*
욕실 급배수음	○		○				○				0.3033*,*
싱크대 급배수음								△			0.1600*,*
변기 급배수음	△		△		△		○				0.3083*,*
피아노 등 악기음			△		△		△				0.2164*,*
TV, 전축 등의 음											0.1555*,*
초인종 소리											0.1953*,*
아이들 뛰노는 소리	△										0.3505*,*
전화벨 소리											0.1048*,*
전화통화 등 회화음											0.0625N.S
쓰레기 낙하음			△		△		△				0.1381*,*
부엌의 조리음											0.2341*,*



<그림 2-2> 가족구성에 따른 내부소음 인지도의 예시

[표 2-7] 어린이 유무에 따른 각 반응의 차이 비교

구분 어린이 유무	위층 소음의 인지도			실내 보행음			위층의 쿵쿵거리는 음			조사 가구
	있음	없음	평균	있음	없음	평균	있음	없음	평균	(n)
A	61.0	20.3	38.2	30.5	10.2	20.7	71.2	35.6	46.7	59
Ba	58.2	34.3	51.2	36.8	19.4	27.0	58.2	31.3	50.9	67
Bb	57.7	34.6	49.5	55.8	17.3	30.2	59.6	30.8	46.8	52
C	62.5	37.5	38.5	40.6	21.9	28.6	65.5	31.3	47.3	32

특히 쿵쿵거리는 소리에 대해서는 약 50% 가량의 거주자의 심리적 피해를 받고 있는 것으로 집계 됐으며 위층 소음의 인지도와 각 내부소음원의 인지도와 상관계수가 $r=0.5189$ 로서 가장 높아 이를 잘 입증해 주고 있다. 보다 구체적으로 분석하기 위해 위층의 쿵쿵거리는 소리와 밀접한 관계가 있는 위층의 가족구성 특히 어린이의 유무를 조사하고 바닥충격음계인 보행음, 쿵쿵거리는 소리의 반응과 위층의 소음인 지도를 조합하여 <그림 2-2>와 같이 도시하였다.

가족구성으로서 보행가능 어린이와 초등학생을 “어린이”로 그 이상을 “성인”으로 표시하여 구분하였고 각 반응요소별 반응의 유무를 나타낸 것이다. 이와 같은 방법에 의해 어린이의 유무에 따른 반응의 비율을 각 구조별로 집계하면 [표 2-7]과 같다. 분석결과 어린이의 유무에 따라 약2~3배의 반응차를 볼 수 있으며, 대체로 위층의 소음인지도는 위층의 아이들 쿵쿵거리는 충격음의 가장 직접적으로 인지하는 주요 소음원임을 확인할 수 있다. 그 밖의 급배수음의 지적율이 30~40%이고 고층아파트인 구조 Ba, Bb, C의 경우 쓰레기 낙하음의 지적률도 다소 높게 나타났으나, 이는 주로 설비상으로는 절연방법에 관한 문제이며, 바닥구조체의 차음성능과는 직접적으로 관계되지 않는다고 할 수 있다. 따라서 거주자가 느끼는 주요소음원이 어린이와 관련된 바닥충격음임을 감안할 때 차음등급 및 기준설정 등 차음성능 평가방법 설정시 주로 이에 대한 충격음의 음향적 특성이 충분히 검토되고 반영되어야 할 것이다.

2.3 바닥충격음에 대한 차음성능 측정 및 평가방법

2.3.1 각국의 바닥충격음레벨 측정방법

[표 2-8]은 우리 나라, 일본, ISO, 미국, 서독의 바닥충격음 레벨 측정방법을 비교한 것이다. 바닥충격음 측정시 ISO, ASTM, DIN에서는 1/3 Octave band별로

측정하지만, 우리 나라와 일본에서는 1/1 Octave band별로 측정하고 있다. 바닥충격을 측정 시 ISO, ASTM, DIN에서는 구두를 신고 다니는 입식생활을 하기 때문에 하이힐 소리와 유사토록 고안된 경량표준충격원(Tapping Machine)만을 이용하고 있다. 그러나 우리 나라와 일본에서는 좌식생활을 하고 맨발로 활동하기 때문에 어린이의 뛰노는 소리가 주요 소음원이 되고 있으므로, 이 소리와 유사한 중량표준충격원(Tire)을 이용하고 있다. 충격원의 차이는 생활습관의 차이를 의미하며, 이러한 이유로 우리 나라에서는 저주파 대역에서 바닥구조의 음향성능을 평가하기 위해 측정 주파수대역이 63Hz부터 측정하고 있으며, 1/3 Octave band보다 저주파수에 오차가 적은 1/1 Octave band를 채택하고 있다. 측정점의 개수도 우리 나라에서는 공간적인 평균을 더 많이 하기 위해 5장소 이상이며, 측정기의 동특성은 중량 표준충격원의 충격력 특성 때문에 Fast로 하였다. 또한 ISO, ASTM, DIN에서는 흡음력을 보정하고 있으나, 우리나라 및 일본에서는 주택의 경우 방의 넓이가 대동소이하고, 실내마감도 흡음력이 크게 변할 만큼 다르지 않기 때문에 흡음력은 보정하지 않고 있다.

[표 2-8] 각국의 바닥충격음레벨 측정방법 비교

구 분 \ 각국기준	KS(JIS)	ISO (국제규격)	ASTM (미국)	DIN (독일)
충격원	경량 / 중량충격원	경량충격원	경량충격원	경량충격원
측정주파수 대역	63Hz ~ 4KHz	100 ~ 3150Hz	좌동	100 ~ 3200Hz
측정주파수	1/1 Octave band	1/3 Octave band	좌동	좌동
측정점의 개수	5장소 이상	4장소 이상	-	-
측정기의 동특성	fast	slow	-	-
측정범위	현장측정	실험 및 현장측정	실험실 측정	실험 및 현장측정
흡음력의 고려	보정하지 않고 일정하다고 가정	바닥충격음레벨 산정시 흡음력에 대한 보정	좌동	좌동

2.3.2 각국의 평가 방법과 차음성능 기준

1) 각국의 차음성능 기준곡선

가. 일본 : 역 A특성 곡선

나. ISO 및 서양 : Impact Insulation Class(IIC)곡선

2) 차음성능 기준곡선의 비교

ISO 및 DIN에서의 기준곡선은 315Hz이하에서 평탄하고 315Hz와 1000Hz이상에서는 9dB/oct의 비율로 저하하는 특성을 가지고 있어, Tapping Machine으로 약간 연질의 플라스틱 마감바닥을 타격 할 때의 바닥충격음 레벨에 근접하고 있다. 즉 Tapping Machine과 같이 그다지 유연하지 않은 바닥마무리의 바닥충격음 레벨 피크에서 비교적 잘 어울리므로 유럽처럼 두꺼운 고강성 슬래브 위를 하이힐로 걸음으로써 고음역이 문제가 되는 조건에서의 차음성능 평가에 적당하다. 그러나 일본에서와 같이 실내에서 맨발로 생활하는 경우, 저음역의 바닥충격음이 문제가 되므로 ISO처럼 125~315Hz가 평탄할 경우 적절한 평가가 될 수 없다. 따라서 주파수범위를 저음역에 1Octave넓혀서 63~4000Hz로 했으며 역 A특성 곡선을 사용해 저주파수 대역의 비중을 높였다.

2.3.3 국내의 차음성능에 관한 관련법규 및 기준

1) 건축관계 법규상의 관련기준

- ㉠ 건축법 시행령 제53조 (경계법 및 간막이벽의 구조)
- ㉡ 건축법 시행규칙 제31조 (경계법 및 간막이벽의 차음구조)
- ㉢ 주택건설촉진법 제45조 (공업화 주택의 인정 등)
주택건설촉진법 제45조의 2 (우량 주택자재의 인정 등)
- ㉣ 주택건설기준 등에 관한 규정 제9조 (소음 등으로부터의 보호)
주택건설기준 등에 관한 규정 제10조 (공동주택의 배치 등)
주택건설기준 등에 관한 규정 제14조 (세대간의 경계 벽)
주택건설기준 등에 관한 규정 제37조 (난방설비 등)
주택건설기준 등에 관한 규정 제61조의 2 (공업화 주택의 인정 등)
주택건설기준 등에 관한 규정 제62조 (우량주택 자재의 인정)
- ㉤ 건설부 고시 제463호 1986.10.15 (공동주택의 소음측정기준)
건설부 고시 제12469호 1993.7.20 (공업화주택의 성능 및 생산기준)

2) 한국공업규격상의 관련기준

- ㉠ KS A 0701 : 소음도 측정방법
- ㉡ KS F 2808 : 실험실에서의 음향투과손실 측정방법
- ㉢ KS F 2809 : 건축물의 현장에 있어서 음압 레벨차 측정방법
- ㉣ KS F 2810 : 건축물 현장에 있어서 바닥충격음 측정방법
- ㉤ KS F 4722 : 조립용 콘크리트 벽판

- ㉠ KS F 4724 : 건축용 벽판(철강재)
- ㉡ KS F 4725 : 조립용 나무 올가미 벽판
- ㉢ KS F 4726 : 조립용 콘크리트 바닥판
- ㉣ KS F 4727 : 조립용 나무 올가미 바닥판
- ㉤ KS F 4728 : 건축용 바닥판 (철강재)
- ㉥ KS F 4729 : 조립용 콘크리트 지붕판
- ㉦ KS F 4730 : 조립용 나무 올가미 지붕판

상기와 같은 한국공업규격(KS)중 콘크리트를 사용한 바닥제품의 차음성능에 대한 기준 및 평가방법에 대해 관련 있는 규정은 KS F 4726(조립용 콘크리트 바닥판)에 500Hz의 음에 대해서만 규정되어 있고, 측정방법은 실험실에서 음향투과손실 측정방법에 따르도록 되어 있다. 그러나 실험실에서의 음향투과손실 측정방법(KS F 2808)은 바닥충격음에 대한 측정방법이 아니므로 바닥충격음 기준 및 평가방법에 대한 규격은 전혀 없다고 할 수 있다.

3) 공업화 주택 성능인정제도에 의한 차음성능기준

공업화주택 성능 및 생산기준에 의한 바닥충격음의 차단성능 측정방법은 KS F 2810에 의한다. 중량 및 경량충격원에 대한 차단성능기준이 있으나, 그 내용은 차음성능 평가방법이라고는 할 수 없고, 내용 또한 잘못된 부분이 있어 수정을 요하고 있다.

4) 대한주택공사의 차음성능기준

대한주택공사에서는 평가방법으로 L곡선을 선택하고 있으나, 일본에서의 5dB의 간격에 의한 등급이 아니라 지수로 표시하고 있다. 바닥충격음에 대한 차음성능기준은 권장치로 L-45 (중량충격원) L-65 (경량충격원)를 제시하고 있고, 유예 기준치로 L-50 (중량충격원) L-70 (경량충격원)을 제시하고 있다. 허용범위는 차음지수 2를 두고 있다.

3. 결 론

프라이버시의 확보와 밀접한 관계를 갖는 주거공간의 차음성능은 건축물의 설계에서 반드시 고려하여야 할 중요한 성능 가운데 하나가 되었다. 거주자가 원할 때 마음대로 소리를 내고 각종 거주행위를 할 수 있는 권리와 타인에 의해 방해받지 않으려는 요구의 사이에는 다양한 음향성능이 필요하며, 그 가운데 바닥충격



음에 대한 차음성능은 가장 시급히 해결되어야 할 사항에 해당한다.

최근 바닥충격음에 대한 공동주택 거주자의 불만이 심화되면서 새로운 바닥구조 개발에 대한 관심의 고조와 연구가 활발히 이루어지고 있다. 그 결과 독특한 바닥구조를 개발하여 타 건설업체와 차별화를 꾀하는 업체도 다수 나타나고 있다. 이러한 현상은 공동주택의 분양가가 자율화되고 거주자의 쾌적한 주거환경의 질적 수준에 대한 권리가 확대되면서 더욱 증가할 것으로 보인다.

말뚝기초의 내진설계

기술연구소 토목기사 김호비

1. 서론

말뚝은 상부지반의 지지력이 작을 때, 상부구조물의 하중을 지지력이 큰 하부의 지반이나 암반층에 전달하기 위해 놓은 길고 가는 부재를 말한다. 말뚝기초는 말뚝이라는 부재와 그 주변의 지반을 총칭하는 것으로서 최근 홍성지진(1978), 백령도지진(1995), 영월지진(1996), 경주지진(1997) 등 중규모 지진 발생이 빈번하여 한반도가 지진의 안전지대가 아니라는 우려와 함께 이의 내진성능에 대한 관심이 높아지고 있다.

말뚝기초의 경우, 지진이 발생하면 진원지에서 오는 지진하중이 지층을 통해 전파하면서 증폭, 감쇠를 거쳐 대상 지반에 작용하고, 지반에 기초한 말뚝에 동적 하중을 가하게 된다. 말뚝에 가해진 동적 하중은 동적 응답을 발생시키며 이로 인해 새로운 응력파가 발생되고 이는 다시 인접 지반에 영향을 준다. 이와 같이 구조물의 지진응답과 구조물에 인접한 지반 매질의 운동이 서로 영향을 주고 받는 현상을 지반-구조물 상호작용(soil-structure interaction)이라고 한다.

그러나 현재 이와 같은 해석방법은 지반-구조물 상호작용에 대한 모델링, 지반의 동적물성치 추정 등의 어려움 등 여러 가지 숙제를 가지고 있다.

그러므로 본고에서는 이러한 방법을 간편화한 의사정적해석에 의한 말뚝기초의 내진해석에 대하여 설명한다.

의사정적해석이란 지진하중에 의해 발생하는 상부구조물의 변위를 등가정적하중으로 바꾸어서 기초구조물의 상단부에 작용시켜 해석하는 방법으로서 지진하중(주로 수평하중)을 조합한 상부구조물의 하중을 말뚝머리의 확대기초에 단면력으로 작용시킨다. 이와 같은 방법을 이용하여 말뚝을 해석할 때에는 말뚝의 횡방향 변위와 말뚝본체의 응력을 엄밀히 검토하여야 한다.

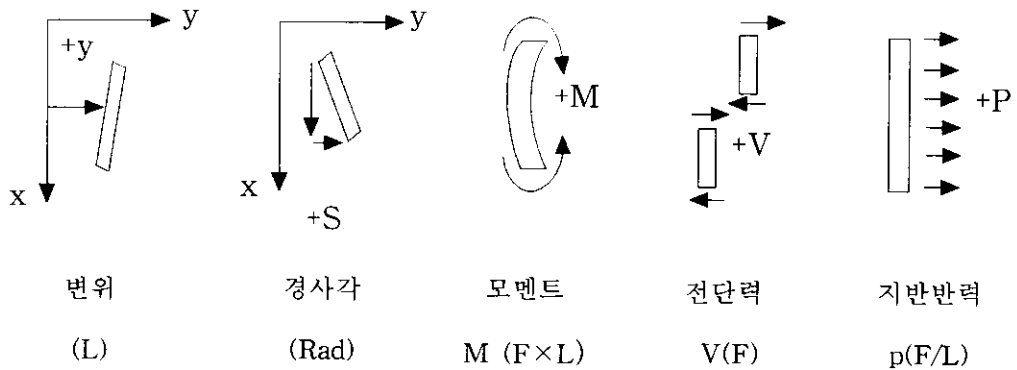
본론에서는 1998년도 지진공학회 기술강습회의 내용을 중심으로 말뚝을 선형탄성으로 가정한 지반에 놓인 보로 해석하는 해석적 방법과 지반의 비선형 해석의 근간이 되는 유한차분법(FDM ; finite difference method)과 p-y 곡선에 대하여 설명하고 하중의 특성, 흙의 종류에 따른 해석방법에 대하여 설명한다.

2. 탄성지반에 놓인 보(Beam) 이론

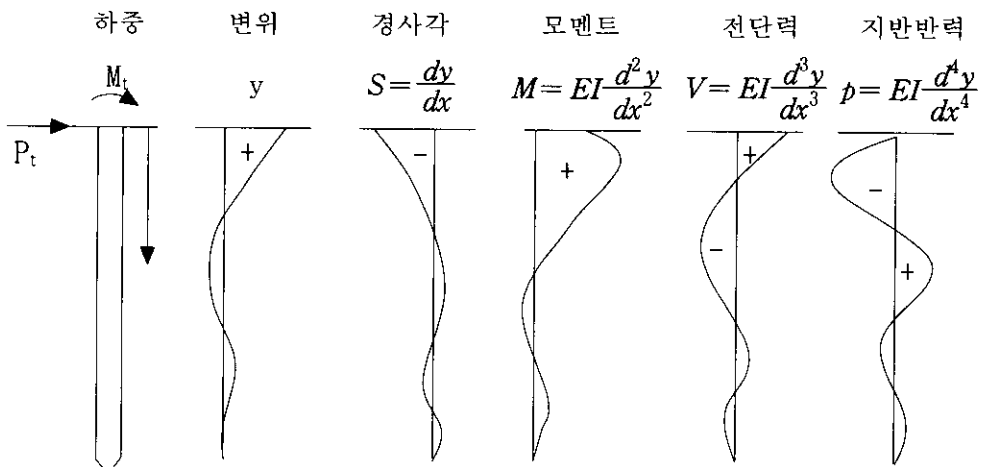
2.1 미분방정식(beam equation)

횡하중을 받는 말뚝을 해석할 때에는 평형조건과 적합조건을 만족시켜야 한다. 이 2가지 조건을 만족하기 위해서 지반과 말뚝의 변위가 일치해야 하고 말뚝의 변위는 지반반력의 적절한 분배에 의해 계산되어야 한다.

기본적인 부호 규약은 <그림 2-1>과 같은데 이와 같이 부호를 정하면 미분방정식의 부호를 걱정할 필요가 없다.



<그림 2-1> 부호범례(sign convention)



<그림 2-2> 미분방정식

2.2 해석적 방법(closed-form solution)

해석적 방법은 다음과 같은 가정하에 구할 수 있다.

- 1) EI(말뚝의 휨강성)는 일정하다.
- 2) 말뚝은 길이가 긴 보(long beam)이며 하중은 한쪽 단(두부)에만 작용한다.
- 3) 지반변형계수(α)는 깊이와 변위에 관계없이 일정하다.

말뚝을 탄성지반에 지지된 보라고 가정하였으므로 지반에 놓인 말뚝의 휨변형에 관한 기본방정식은 (식 2.1)과 같다.

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} = p \quad (\text{식 2.1})$$

(식 2.1)을 이용하여 말뚝의 변위를 수식으로 표현하면 (식 2.2)와 같다.

$$y = e^{-\beta x} [C \cos \beta x + D \sin \beta x] \quad (\text{식 2.2})$$

여기서 나타낸 β 는 지반강성과 말뚝강성의 상대적 크기를 나타내는 계수로서 단위는 $[L^{-1}]$ 이고 C, D는 경계조건에 따라 결정되는 계수이다. (식 2.2)는 단조감소함수인 지수함수로 말뚝이 깊이 내려갈수록 절대변위가 작아지는 것을 표현하였고 주기함수인 삼각함수로 변위의 방향을 표현하였다.

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{K_H D}{4EI}}$$

(식 2.3)

<그림 2-2>에서 표시한 미분방정식과 경계조건으로부터 경사각, 모멘트, 전단력, 지반반력을 얻을 수 있다.

3. 수치해석

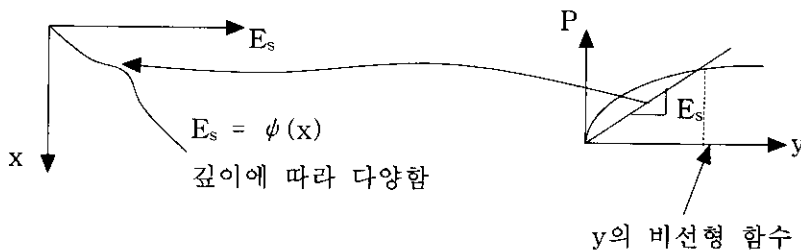
3.1 지배방정식(governing equation)

말뚝의 비선형 해석을 하기 위해 도입한 지배방정식은 다음과 같다.

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + Q \frac{d^2 y}{dx^2} + ky = 0 \quad (\text{식 3.1})$$

여기서, Q 는 말뚝에 작용하는 연직하중을 의미하며 깊이가 변해도 연직하중이 미치는 크기는 일정하다는 가정을 가지고 있다. 이 가정은 좌굴이 일어나는 경우를 제외하고는 실제 거동에 잘 부합되는 가정이라고 할 수 있다. k 는 지반변형계수를 의미하며 말뚝이 놓인 깊이, 말뚝의 변위, 지반조건에 따라 다른 값을 갖는다. k 는 평판재하시험으로부터 얻은 응력-변위량 곡선의 할선구배에 해당되며 단위는 kg/cm^3 이다. 또는 일축, 삼축압축시험, 공내재하시험, 표준관입시험에서 구하는 방법이 도로교 표준 시방서(1996)에 게재되어 있다. 여기서 주의할 점은 지반반력계수는 분포하중을 받는 반무한 지반의 변형거동에 입각하여 산출한 것이다.

(식 3.1)이 말뚝변위(y)에 대한 선형식임에도 불구하고 k 값은 말뚝변위(y)에 대한 비선형함수이므로 수치해석을 이용하여 해를 구한다.

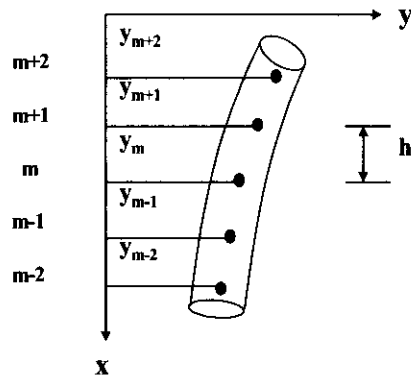


<그림 3-1> 말뚝의 일반적인 p-y 곡선

3.2 유한차분법(FDM ; finite difference method)

유한차분법에 의하여 해를 구하려면 실제로 존재하지 않는 가상의 점을 2개 도입하여 Gleser(1953)의 해법을 이용, 다음과 같은 4가지 말뚝 머리 경계조건을 가지고 해를 얻는다.

- 1) 말뚝머리에서 횡하중(P_t)과 모멘트(M_t) 값이 주어질 때
- 2) 말뚝머리에서 횡하중(P_t)과 경사각(S_t)값이 주어질 때
- 3) 말뚝머리에서 횡하중(P_t)과 회전-구속계수(M_t/S_t)값이 주어질 때
- 4) 말뚝머리에서 모멘트(M_t)와 변위(y_t)값이 주어질 때



<그림 3-1> 말뚝에 적용한 유한차분법의 절점

<그림 3-1>에서 절점 (m)에서의 경사각을 절점(m+1)과 절점(m-1)의 변위를 이용하여 구한 후 미분하여 정리하면 절점 (m)에서 미분방정식의 수치해석적 형태를 구할 수 있다.

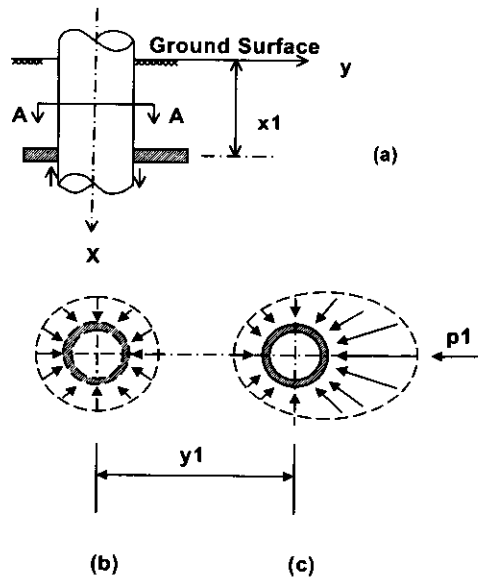
4. p-y 곡선

4.1 개요

앞장에서 언급한 바와 같이 지배방정식의 해를 얻으려면 지반반력(p)과 말뚝변위(y)의 관계가 정립되어야 한다. 지반반력과 말뚝변위의 관계가 Reese(1989)에 의해 실험적으로 정립되었다.

<그림 4-1> (a)는 지반에 놓인 말뚝의 입면도이다. 말뚝이 놓인 후 지표면으로부터 깊이 x1에 있는 말뚝주변 지반요소를 생각해 보면 깊이 x1에서 초기 응력 분포는 <그림 4-1> (b)와 같이 평형상태에 있다. 말뚝에 변위 y1이 일어나면 <그림 4-1> (c)와 같이 말뚝의 전면에서는 응력이 증가하고 배면에서는 응력이 감소한다. 이 응력 분포를 적분하여 얻어진 힘의 불균형 값 p가 변위의 반대방향으로 저항하게 된다. 지반반력 p의 값이 깊이(x)와 말뚝의 변위(y)에 따라 정의될 수 있으면 매우 바람직하다. 지반반력을 좌우하는 요소는 말뚝의 기하학적 제원, 지반

물성과 하중의 특성(정하중, 반복하중, 항구적인 하중, 충격하중) 등이다. 그러나 실제적으로 이러한 모든 요소를 감안한 해석 방법은 불가능하므로 극한 지반저항(ultimate soil resistance) p_u 를 깊이 별로 계산하여 근사적인 방법으로 해석한다.

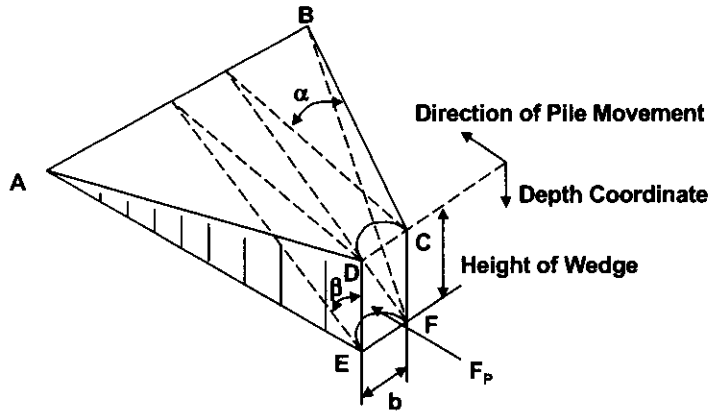


<그림 4-1> p 와 y 의 정의

극한지반저항력 p_u 는 다음과 같은 2가지 모델에 입각하여 계산한다. 첫 번째 모델은 <그림 4-2>와 같이 말뚝에 변위가 생기면 흩썩기가 경사진 저면과 양측면을 따라 미끄러져 올라간다. 이 면에 발생하는 마찰저항이 수평력 F_p 와 비기계된다. 이때 극한저항력 p_u 는 F_p 의 깊이에 대한 미분값에 해당된다. 이러한 흩썩기 형태의 지반 파괴는 비교적 지표면과 가까운 곳에서 일어나는데 Broms에 의하면 그 깊이는 말뚝 직경의 1.5배 정도이다.

지표에서 어느 정도 깊어지면 흩썩기 형태의 파괴보다는 흩입자가 말뚝의 전면으로부터 배면으로 이동하는 ‘우회유동(flow-around)’ 파괴현상이 일어난다. 이 형태의 파괴 모델에서 극한저항력 p_u 는 대략 지표면에 놓인 대상 기초(strip footing)의 지지력(bearing stress)의 2배 정도이다. 그 이유는 반무한 탄성체에 놓여있다고 가정하고 계산한 대상 기초(하단구속)에 비해 지표로부터 깊은 곳에서 횡하중을 받는 말뚝은 마치 무한 탄성체(상·하단구속)에 놓인 대상기초와 비슷한

거동을 보이기 때문이다. 예를 들면, 포화된 점성토 지반 위에 놓인 대상기초(strip footing)의 지지력은 $5C$ (여기서 C 는 비배수 전단강도)이고, 우회유동 파괴에 의한 p_u 는 $9C$ 가 된다.

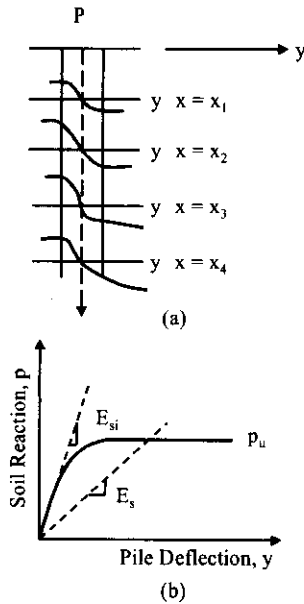


<그림 4-2> 지표부근의 p_u 계산을 위한 흩썰기 모델

이와 같이 수평하중을 받는 말뚝을 해석하려면 깊이별 말뚝변위에 따른 p - y 곡선이 필요하다. 전형적인 p - y 곡선의 형태는 <그림 4-3>과 같다. <그림 4-3>에서 이 곡선은 깊이(x), 초기탄성계수(E_{si}), 극한저항(p_u)에 따라 변하고 있다. 이 곡선을 2사분면과 4사분면에 그린 이유는 p 와 y 의 부호와 반대이기 때문이다. <그림 4-3> (b)는 전형적인 p - y 곡선을 편의상 1사분면에 표시한 것이다. 두 개의 점선 중 초기탄성계수(E_{si})는 곡선 초기부분의 기울기이다. 말뚝의 변위가 증가하면 그 변위에 이르는 활선(secant)의 기울기, E_s 는 점차 감소한다. 변위가 과다해지면 지반의 탄성계수, E_s 는 매우 작은 값을 갖는다. 따라서, E_s 는 말뚝변위와 깊이에 따른 비선형 함수이며 p - y 곡선을 이용한 해석은 반복계산이 필요하므로 전산프로그램이 필수적이다.

4.2 하중특성에 의한 영향

말뚝머리에 작용하는 수평하중은 정하중, 반복하중, 지속하중, 동하중의 4종류로 분류할 수 있다. 수평하중을 받는 말뚝을 해석할 때에는 하중종류를 반드시



<그림 4-3> 전형적인 p-y 곡선

고려하여야 하는데 이러한 하중특성을 고려하여 얻은 p-y 곡선은 현장에서 실물규모(full-scale)의 말뚝재하시험으로부터 얻은 결과를 정리한 것이다.

4.2.1 정하중(static loading)

수평하중을 단계별로 증가시켜 가며 얻은 계측결과를 정리하여 수식적으로 처리한 것이 정하중에 대한 p-y곡선이다.

설계 측면에서 정하중에 대한 p-y곡선은 다음과 같은 경우에 적용된다.

- ① 반복되지 않고 단기간에 작용하는 하중
- ② 토압과 같이 지속적인 하중(말뚝 주변 지반이 압밀이나 크리프(creep)가 일어나지 않을 경우, 즉 과압밀점토, 모래지반, 풍화토 및 풍화암 지반에 작용하는 토압)

4.2.2 반복하중(repeated or cyclic loading)

각 하중단계에서 반복하중을 더 이상의 수평변위나 말뚝의 휨모멘트 증가가

없을 때까지 반복하여 얻은 계측결과로부터 p-y곡선을 구하였다. 단단한 점성토 지반(stiff clay)에 지표수가 있을 경우, 반복하중에 의해 발생하는 지반과 말뚝 사이의 틈새로 지표수가 유입되어 흡입자의 분출과 함께 주변지반이 연약해져 상당한 지반반력의 저하가 초래된다. 이러한 지반저항의 감소를 지반 상황에 따라 현명하게 판단하여 적용하여야 한다.

반복하중의 실제 경우는 다음과 같다.

- ① 광고 간판과 고층건물에 작용하는 풍하중
- ② 교량의 교통하중
- ③ 해상 구조물에 작용하는 파랑하중
- ④ 항만 호안 및 방파제에 작용하는 충격하중

4.2.3 지속하중(sustained loading)

과압밀 점토나 깨끗한 모래지반에서는 압밀이나 크리프(creep)에 의해 발생하는 수평변위 증가가 무시될 정도이다. 반면에 포화된 연약한 점토지반에서는 말뚝에서 지반으로 전이(transfer)되는 응력에 의해 발생하는 압밀과 크리프에 의해 상당한 수평변위가 추가로 발생된다. 이러한 경우에는 추가로 발생하는 수평변위를 고려하여 p-y 곡선을 수정한 후 반복적인 해석을 시도하여야 한다.

4.2.4 동하중(dynamic loading)

동하중과 관련된 설계는 아래와 같다.

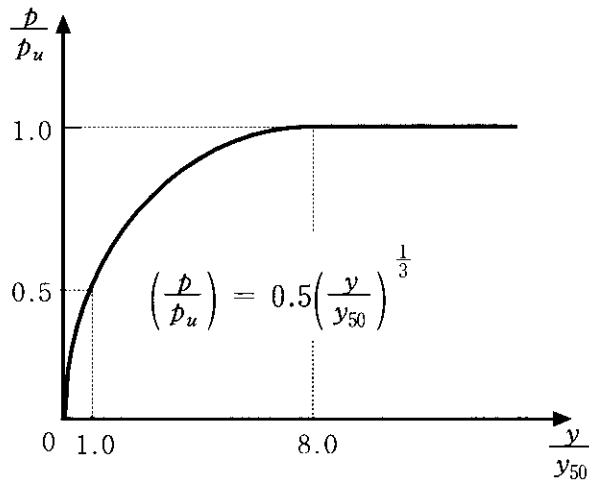
- ① 진동기계기초(vibratory machine foundations)
- ② 지진

진동기계기초에서 발생하는 변위는 대개 상당히 작아 동적 물성치를 사용하여 해석하고 여기에서 언급되는 p-y 곡선에 의한 해석방법이 적용되지 않는다.

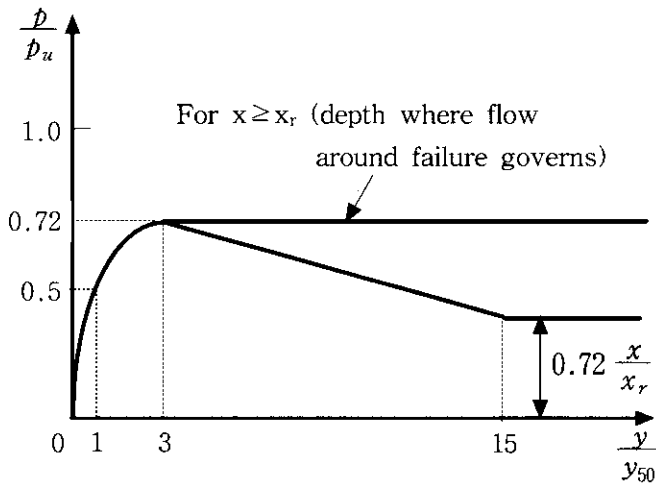
4.3 제안된 p-y 곡선

4.3.1 물이 있는 경우의 연약한 점성토의 지반반력(Soil resistance)

Matlock(1970)은 직경 32.4cm, 길이 12.8m의 강관말뚝을 비배수 전단강도가 $3.9t/m^2$ 와 $1.46t/m^2$ 인 점성토 지반에서 각각 재하시험을 시행한 결과로부터 p-y 곡선을 모델링하였다.



(a) 정하중인 경우



(b) 반복하중인 경우

<그림 4-4> 물이 있는 경우 연약한 점성토의 p-y 곡선

단기간의 정하중이 작용할 때 p-y 곡선 산출방법은 <그림 4-4> (a)와 같고 반복하중에서는 <그림 4-4> (b)와 같이 물이 상당한 영향을 주고 있다.

정하중인 경우, p-y 곡선의 산출방법은 다음과 같다.

- 1) 깊이별 비배수 전단강도와 수중단위중량을 추정한다. ϵ_{50} 은 삼축압축시험을 실시하여 최대축차응력 50%지점의 변형도(strain)에서 구한다. 시험을 실시하지 못할 경우 <표 4-1>에서 ϵ_{50} 을 선택한다.

[표 4-1] 물이 있는 점성토의 경우 대표적인 ϵ_{50}

연 경 도(Consistency of clay)	ϵ_{50}
연 약 함(Soft)	0.02
중 간 정 도(Medium)	0.01
단 단 함(Stiff)	0.005

- 2) 말뚝의 단위 길이당 극한지반저항력 p_u 는 다음 식에서 구한 값 중에서 작은 값을 취한다.

$$p_u = \left[3 + \frac{\gamma}{c} x + \frac{J}{b} x \right] cb \quad (\text{식 4.1})$$

$$p_u = 9cb \quad (\text{식 4.2})$$

여기서 γ = p-y 곡선을 구하는 깊이까지의 평균유효단위중량

x = 지표면에서 떨어진 깊이

c = 깊이 x 에서 비배수전단강도

b = 말뚝의 폭(또는, 직경)

J = Matlock(1970)이 실험을 통해 구한 실험적 계수로서 연약한 점성토는 0.5, 중간정도의 점성토는 0.25로서 대개 0.5를 사용한다.

- 3) 극한지반저항력 p_u 의 50%에 해당하는 변위 y_{50} 을 (식 4.3)에서 구한다.

$$y_{50} = 2.5 \epsilon_{50} b \quad (\text{식 4.3})$$

- 4) p-y 곡선상의 점을 (식 4.4)에서 구한다.

$$\frac{p}{p_u} = 0.5 \left(\frac{y}{y_{50}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (\text{식 4.4})$$

물이 있는 연약한 점성토에서 정하중을 받는 경우, p-y 곡선에서 $y = 8y_{50}$ 이상인 점에서는 일정한 p 를 유지한다.

다음은 반복하중인 경우에 산출 과정이다. - <그림 4-4> (b) 참조

- 1) $p = 0.72p_u$ 이하에서는 정하중 경우와 마찬가지로 산출한다.
- 2) (식 4.1)과 (식 4.2)를 연립하여 풀어, x_r (흙짜기와 우회유동 파괴가 동시에 일어나는 깊이)을 구한다. x_r 까지 단위중량과 전단강도가 일정하면 x_r 은 (식 4.5)와 같다.

$$x_r = \frac{6cb}{(\gamma b + Jc)} \quad (\text{식 4.5})$$

단위중량과 전단강도가 깊이에 따라 변하면 해당 깊이의 c 와 γ' 을 사용하여 (식 4.1)과 (식 4.2)로부터 x_r 을 구한다.

- 3) p-y 곡선을 구하고자 하는 위치가 2)에서 계산된 x_r 보다 크거나 같을 때, $y/y_{50} = 3$ 이상인 위치의 p는 $0.72p_u$ 로 일정한 값을 가진다.
- 4) 깊이가 x_r 이하일 때, $y = 3y_{50}$ 부터 $y = 15y_{50}$ 까지의 p는 (식 4.6)과 같이 감소한다.

$$p = 0.72 p_u \left(\frac{x}{x_r} \right) \quad (\text{식 4.6})$$

$y = 15y_{50}$ 이상에서의 p는 일정한 값을 유지한다. Matlock(1970)은 이러한 p-y 곡선 산정에 필요한 토질시험을 아래와 같은 우선 순위로 권장하고 있다.

1. 토질분류를 위해 시료채취를 병행한 현장 베인시험
2. 상재하중과 동일한 축압으로 실시한 비압밀비배수시험(UU Test)
3. 셀비튜브에서 추출한 시료로 한 미니 베인시험
4. 일축압축시험

이상과 같은 강도시험 외에 단위중량의 측정이 필수적이다.

5. 결 언

4장에서 소개한 것 외에 물이 있는 단단한 점성토(stiff clay), 물이 없는 단단한 점성토, 지하수가 있는 모래층, 암반에 대한 지반반력에 관한 p-y 곡선이 정리되어 있으나 너무 수식적인 나열이 될 듯하여 생략하도록 한다.

여기에서 소개된 p-y 방법은 산간지역 도로교의 말뚝 기초 설계에는 과분한 연장이라 사료되고 해안지역에서 연약층이 깊어 긴 말뚝을 사용할 경우, 말뚝이 수평하중이나 지진하중을 받는 경우에는 지반의 비선형 특성이 고려되어야 하므로 이 방법을 사용하는 것이 알맞다고 생각된다.

휨 인성 시험(Test for Flexural Toughness)

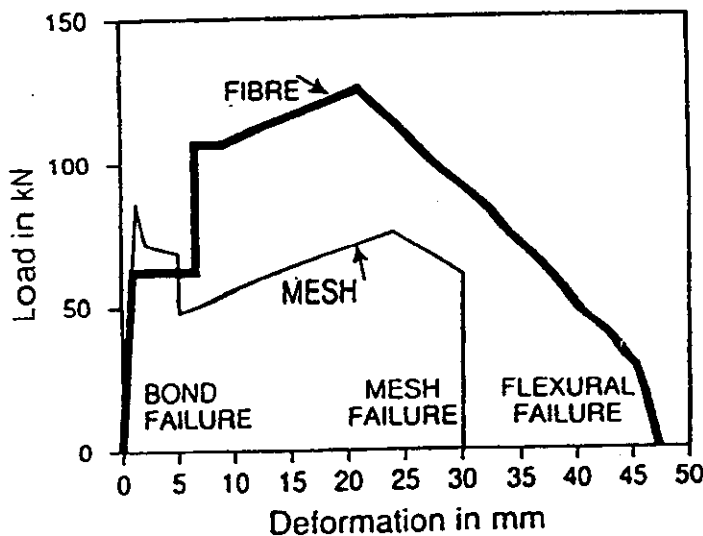
기술연구소 토목차장 김덕성

1. 개요

기존의 슛크리트는 인장, 휨 및 충격강도 등의 역학적 특성 및 에너지 흡수능력이 작다는 문제점을 안고 있었으며 이를 보완하고자 와이어메쉬 보강슛크리트 공법을 사용하여 왔으나, 최근에는 와이어메쉬공법보다 큰 Toughness 향상, 균열 저항성 향상, 지보내력향상 및 박리방지효과를 발휘하는 강섬유(Steel Fiber)를 사용하는 슛크리트 공법을 사용하고 있다.

2. 강섬유 보강 슛크리트와 와이어메쉬 보강슛크리트의 비교

강섬유보강슛크리트(SFRS)는 1970년대초부터 wire mesh reinforced shotcrete의 대체공법으로 사용되어 왔으며, 현재 이 공법을 적용하지 않는 나라는 거의 없으며, NATM공법의 선진국인 스칸디나비아 국가들의 경우 1980년 이후부터 WMRS로 설계되거나 시공된 현장은 거의 전무한 실정이다. <그림 2-1>은 SFRS와 WMFS의 Falling Block Test에 의해 얻어진 대표적인 하중-처짐선도이다.



<그림 2-1> Falling Block Test에 의한 SFRS와 WMRS의 하중-처짐선도

<그림 2-1>에서 알 수 있듯이 SFRS의 Toughness값이 WMFS의 값에 거의 두배에 이르고 있다. 특히, 인성과 휨강도의 증진은 그 파괴모드에서 분명하게 나타난다. 즉, SFRS(강섬유보강 슛크리트)의 파괴는 큰 변형이 일어나야만 완전한 파괴가 발생하며 균열이 발생한 후에도 하중전달능력은 유지된다.

이처럼 후균열 저항성(Post-crack resistance)은 shotcrete에 강섬유가 부여하는 최대이점인 인성증대로서 Mine 이나 Tunnel Linings와 같은 상대적으로 큰 변형이 발생하는 곳에서의 적용이 유리하다.

3. 강섬유(Steel Fiber)

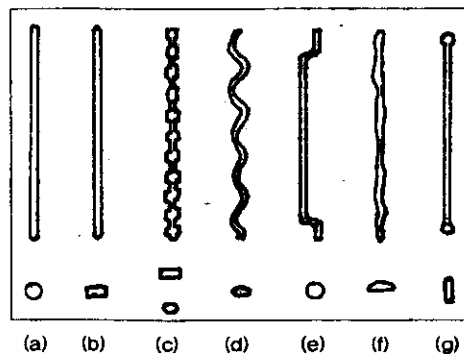
3.1 강섬유의 분류

3.1.1 제조방법에 의한 분류

- 1) 강선을 절단하여 제조한 것(강선절단법)
- 2) 냉연강판을 절단하여 제조한 것(박판절단법)
- 3) 두꺼운 강판을 절삭하여 제조한 것(후판절삭법)
- 4) 용강으로부터 직접 추출하여 제조한 것(용강추출법)

3.1.2 강섬유 형상에 따른 분류

강섬유의 형상은 시멘트콘크리트 속에서 콘크리트와 부착력 및 인발에 대한 저항력과 같은 기계적인 특성에 많은 영향을 준다. 현재 콘크리트의 보강재료로 사용되고 있는 형상은 <그림 3-1>과 같다.



(a) Round (b) Rectangular (c) Indented (d) Crimped
(e) Hooked ends (f) Melt extract process (g) Enlarged ends

<그림 3-1> 강섬유의 형상에 따른 분류

3.1.3 강섬유의 조건

- 1) 분산성으로 콘크리트 내에 분산이 잘 되어야 한다.
- 2) 정착성으로 콘크리트 내에서 빠지지 않고 견뎌야 한다.
- 3) 높은 인장강도로서 외부응력에 강력히 대응을 해야 한다.

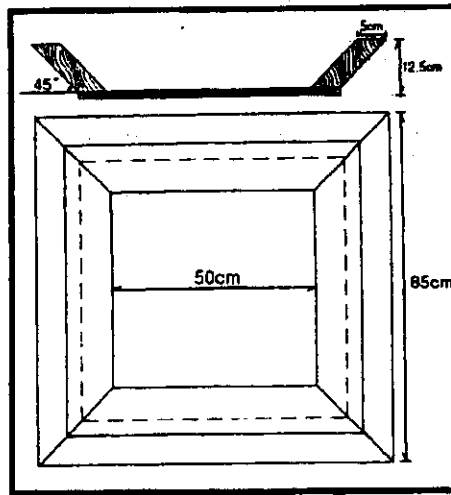
3.1.4 강섬유 선정시 고려 사항

- 1) 강섬유는 건조한 상태에서 녹이 없어야 하며 기름이나 다른 이물질에 의한 오염이 없으며 표면이 코팅되지 않은 상태이어야 한다.
- 2) 강섬유는 콘크리트와의 부착성능이 충분히 발현될 수 있는 형태를 가져야 한다.
- 3) 강섬유는 분산성과 정착성이 좋고 인장강도가 $70\text{kg}/\text{mm}^2$ 이상 이어야 한다.
- 4) 강섬유의 형상비는 강섬유 길이에 대한 직경의 비(ℓ/d)로서 40~100의 범위이어야 한다.
- 5) 강섬유의 함량은 슛크리트 1m³당 40~60kg을 표준으로 하되 설계 휨강도 및 휨인성을 만족시켜야 한다.

4. 휨인성시험

4.1 공시체의 제작

- 1) 모서리가 45° 로 경사진 $500 \times 500 \times 125\text{mm}$ 의 목재나 강재 거푸집을 수직으로 세워서 슛크리트를 친 후 양생한다.
- 2) 슛크리트를 친 후 24시간 이내에 몰드에 충격을 주어서는 안된다.
- 3) 시료채취방법
공시체에 떼어내기는 슛크리트를 친 후 24시간이상 48시간 이내이어야 한다. 슛크리트를 친 후 재령 6일에 콘크리트 절삭기를 사용하여 규정된 치수($100 \times 100 \times 350\text{mm}$)로 절단하여 시편을 제작한다. 시편은 거푸집의 모서리를 피해서 채취하여야 한다.
- 4) 시편제작 전후 수조에서 양생시킨 후에 재령 28일에 시험을 실시하여야 한다.



<그림 4-1> 시편제작 몰드

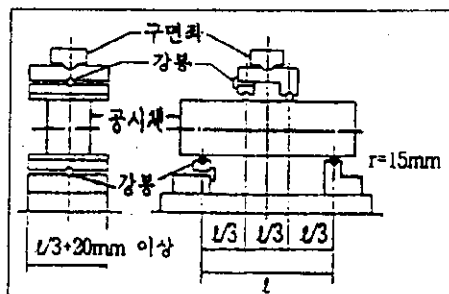
4.2 시험기구

1) 시험기는 KS B 5533(압축시험기)에 규정한 것으로 휨시험장치의 부착이 가능하며 최대용량이 100t 이하인 유압식을 표준으로 한다.

2) 휨시험 장치

3등분점 하중을 재하기 위한 장치는 소정의 처짐량까지 공시체의 변형을 다소라도 구속하는 구조이어서는 안된다.

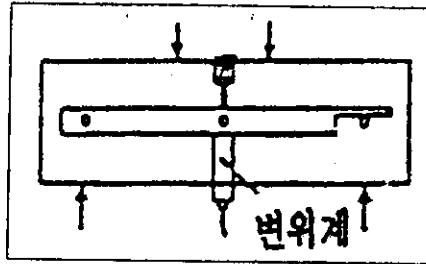
<그림 4-2>는 시험장치 원리의 한 예를 나타낸 것이다. 지점은 공시체의 길이 방향으로 회전 가능한 상하 1조의 로울러(지름 30mm 정도)를 사용한 다.



<그림 4-2> 휨인성 장치

3) 처짐측정장치

공시체의 하중-처짐곡선을 구하는 경우에 사용하는 처짐측정장치는 전기적인 변위계 및 이를 고정시키는 기구로 구성되며 처짐을 정밀도 높게 측정할 수 있는 것이어야 한다.



<그림 4-3> 처짐측정장치

4.3 시험방법

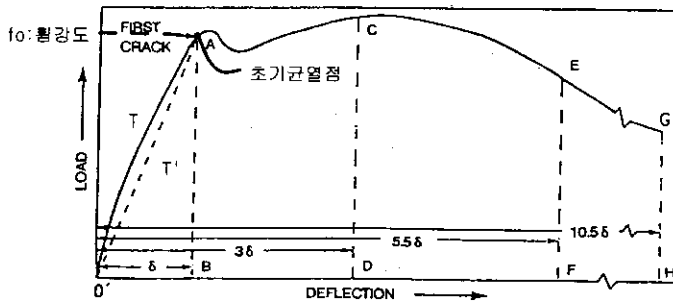
- 1) 공시체는 지점의 폭 중앙에 두고, 스패의 3등분점에 상부가압장치를 접촉시킨다. 이때 재하장치의 접촉면과 공시체와의 사이에 틈이 있어서는 안된다.
- 2) 스패는 공시체 높이의 3배로 한다.
- 3) 공시체에 충격이 가해지지 않도록 하중을 가하며, 처짐을 측정하는 경우에는 처짐속도가 거의 일정하게 유지되도록 재하해야 한다. 기타 제반사항은 ASTM C 1018에 준한다.
- 4) 공시체가 파괴되기까지 시험기가 나타내는 최대하중을 유효숫자 3자리까지 읽는다.
- 5) 파괴단면의 폭은 3개소에서 0.2mm까지 측정하여 그 평균치를 유효숫자 4자리까지 구한다.
- 6) 파괴단면의 높이는 2개소에서 0.2mm까지 측정하여 그 평균치를 유효숫자 4자리까지 구한다.
- 7) 휨인성의 값은 3개 이상의 시험체의 평균치를 나타낸다.

4.4 인성지수의 산정

1) 인성지수(Toughness Index)

인성지수의 산정은 ASTM C 1018방법에 의하며, ASTM C 293 규정의 Center-Point Loading 시스템으로 하중을 가하여 얻어지는 하중-처짐곡선에 의하여 구한다.

또한 <그림 4-6>의 하중-처짐곡선은 초기점에서 약간 볼록한 형상으로 나타난다. 이것은 압축 또는 혹은 인장을 받는 무근 콘크리트의 응력-변형률도와 흡사한데 이때의 초기균열점(A)은 곡률이 처음으로 급격히 변하고, 곡선의 기울기가 분명히 변화하는 양상을 보이는 점이며, 초기 균열점(A)에서 원점 O에 직선을 그어 초기 하중-처짐곡선을 보정하여야 하며 초기면적을 구할 때도 OTA 대신 OT'A를 사용하여 면적을 계산한다.



<그림 4-6> Convex upwards to First Crack

인성지수(Toughness Index)는 주어진 처짐까지의 흡수된 에너지에 대한 초기 균열까지 흡수된 에너지(Absorbed Energy)의 비이다.

<그림 4-5> 및 <그림 4-6>에서 구한 초기균열점(A)까지의 하중-처짐곡선(점선부)도 아래의 면적을 구한 것이 초기 균열까지의 흡수된 에너지이다. ASTM C 1018에 따르면 인성지수 I5, I10 및 I20, I30은 δ 가 초기 균열점에서의 처짐이라면 각각 3δ , 5.5δ , 10.5δ , 15.5δ 까지의 처짐에 대해 정의되는 값들이다.

$$\cdot I_5(3\delta) = \frac{\text{면적} O'ACD}{\text{면적} O'AB} \dots\dots\dots ①$$

$$\cdot I_{10}(5.5\delta) = \frac{\text{면적} O'AEF}{\text{면적} O'AB} \dots\dots\dots ②$$

$$\cdot I_{20}(10.5\delta) = \frac{\text{면적} O'AGH}{\text{면적} O'AB} \dots\dots\dots ③$$

인성지수의 평가는 초기 균열처짐 δ 에 의해 그 산정결과가 크게 영향을 받는다. 그런데 이 값은 약 0.05~0.1mm 매우 작고, 그 값을 산정하는데 있어서의 작은 편차라도 인성지수에 상응하는 처짐치 산정에 큰 영향을 초래하게 된다.

2) 잔류강도(Residual Strength Factor)

인성설계치로서 인성지수(I)를 이용하여 잔류강도지수("R")를 구할 수 있으며 잔류강도지수는 다음과 같이 일반식으로 표현된다.

$$R_{M,N} = \frac{100}{(N-M)} \cdot (I_N - I_M) \cdots \cdots \textcircled{4}$$

여기서, 100/(N-M)은 이상적인 탄소성체(Ideally Elasto-Plastic Material)에 의하여, 잔류강도지수가 탄성영역에서 소성영역으로 천이되는 점에서의 응력치와 같도록 정한 값이다.

이상적인 취성거동을 보이는 무근 콘크리트(Plain Concrete)에서의 $R_{M,N}$ 은 0이며 만일 시험체가 완전한 탄소성체일 경우 $R_{M,N}$ 은 100의 값이 얻어질 것이다.

$$\cdot R_{5,10} = 20(I_{10} - I_5) \cdots \cdots \textcircled{5}$$

$$\cdot R_{10,20} = 10(I_{20} - I_{10}) \cdots \cdots \textcircled{6}$$

$$\cdot R_{10,30} = 5(I_{30} - I_{10}) \cdots \cdots \textcircled{7}$$

Morgan은 1985년이래 Canada 국내에서 수행한 섬유보강 슛크리트(SFRS)에 대한 많은 정규적인 품질관리시험과 연구실험을 통해 SFRS 대해 [표 4-1]과 같은 결론을 얻었다.

[표 4-1] SFRS에 대한 인성지수등급

항목	등급	I_{10}	I_{30}	$R_{30/10}$
I	Marginal	< 4	<12	<40
II	Fair	4	12	40
III	Good	6	18	60
IV	Excellent	8	24	80

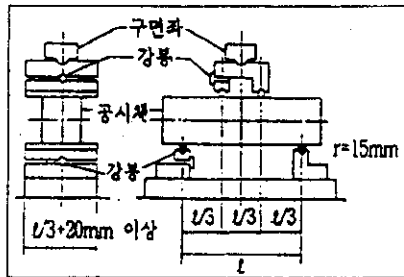
또한 [표 4-2]는 ASTM C 1116-89 "Standard Specification for fiber reinforced Concrete and Shotcrete"에서 규정한 performance Level로서 강섬유의 여러형태에 따라 4단계로 분류하였다.

[표 4-2] 인성지수에 입각한 Performance Level

Performance Level	I ₅		I ₁₀	
	Specified Value	Test Result	Specified Value	Test Result
I	2.7	3.0	5.4	6.0
II	3.6	4.0	7.2	8.0
III	4.5	5.0	9.0	10.0
IV	5.4	6.0	10.8	12.0

4.5 등가휨강도(Equivalent Flexural Strength)의 선정

등가휨강도의 산정은 JCI-SF4방법에 의하여 산정되며, 이 방법에 의한 인성(Toughness)은 에너지흡수능력으로서 에너지적 의미로 표현된다. 이 에너지가 하중과 하중재하방향에 있어서 하중재하점에서의 처짐과의 곱으로 표현되므로, 처짐이 하중재하점에서 측정되어야만 한다. 그러나 이 시험법에서는 하중점에서의 처짐 대신 시험체 Span의 중앙에서의 처짐값을 취하고 있다.

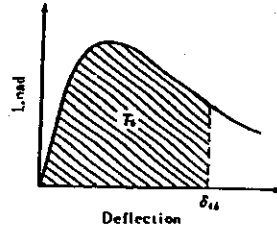


<그림 4-7> 휨강도 시험 개략도

휨시험체의 하중-처짐선도의 형상에 영향을 미치는 것으로는 ①하중재하속도, ②시험장비의 강성, ③지지점에서의 구속도 등을 들 수 있다. 시험속도(하중재하속도)는 단일 시험체의 하중재하를 15~30분만에 끝내기 위해서 분당재하속도를 변위제어방식은 $l/1000 \sim l/3000$ 범위 또는 $0.05 \sim 0.1 \text{ mm/min}$ (ASTM C 1018) 범위에서 실시하여야 하며, 응력제어법으로는 $8 \sim 10 \text{ kg/cm}^2/\text{min}$ (KS F 2408)의 하중증가속도로 재하속도를 조절하여야 한다.

등가휨강도(Equivalent Flexural Strength)는 일정하게 정해진 한계(처짐이 span 길이의 1/150)까지의 하중-처짐선도 아래 면적으로 정의되는 휨인성으로 강섬유 보강체의 인성이 계산된다. <그림 4-8>은 휨인성의 등가휨강도 산정방법을

나타낸 것이다.



<그림 4-8> 휨인성 및 등가휨강도

등가휨강도는 다음식을 이용하여 구한다.

$$\sigma_b = \frac{T_b}{\delta_{tb}} \cdot \frac{\ell}{bh^2} \dots\dots\dots \textcircled{8}$$

여기서, σ_b : 등가휨강도(kgf/cm²)
 T_b : 휨인성(kgf · cm)
 δ_{tb} : 1/150의 값(mm or cm)
span(ℓ)이 30cm : 2mm
span(ℓ)이 45cm : 3mm

5. 시험성과의 분석

<그림 5-1> 및 <그림 5-2>의 휨인성시험성과 및 등가휨강도시험성과는 당사가 수행중인 서해안 고속도로 제21공구 강섬유보강 슛크리트(SFRS)의 초기 배합 설계 시험결과로서 인성지수 및 잔류강도의 등급 산정은 다음과 같다.

5.1 인성지수 및 잔류강도의 등급 산정

<그림 5-1>은 ASTM C 1018 방법에 의한 인성지수(Toughness Index) 및 잔류강도(Residual Strength Factor)에 대한 계산 성과표로서 I_c 는 초기 균열점에서의 처짐이며, I_5 는 (3δ), I_{10} 은 (5.5δ), I_{20} 은 (10.5δ), I_{30} 은 (15.5δ) 처짐에 해당하는 흡수에너지를 식① ~ 식③에 의하여 구한 인성지수이다. 또한 $R_{5,10} \sim R_{10,30}$ 은 식⑤~식⑦에 의해 구한 잔류강도로서 [표 4-1] SFRS에 대한 인성지수등급 I에, [표 4-2] 인성지수에 입각한 performance Level I에 해당한다 할 수 있다.

5.2 등가휨강도의 산정

<그림 5-1>는 JCL-SF4 방법에 의한 등가휨강도(Equivalent Flexural Strength)에 대한 성과표로서 시험시 최대하중이 P=1195.0kg이었으므로

$$1) \text{ 휨강도 } \sigma_b = \frac{P \ell}{bh^2} \Rightarrow \sigma_b = \frac{1195 \times 30}{10 \times 10^2} = 35.85 \text{ kg/cm}^2$$

$$2) \text{ 등가휨강도 } \sigma_{b'} = \frac{Tb}{\alpha b} \times \frac{\ell}{bh^2} \Rightarrow \frac{177.67}{0.2} \times \frac{30}{10 \times 10^2} = 26.65 \text{ kg/cm}^2$$

$$3) \text{ 휨인성계수율 } \frac{\sigma_{b'}}{\sigma_b} = \frac{26.65}{35.85} = 74.34 \% > 68\% \text{ OK}$$

현재 등가휨강도에 대한 시방규정은 도로공사 시방서에 규정된 휨인성시험시 측정된 최대휨강도의 68%이상이어야 한다고 규정되어 있다.

<그림 5-1> 휨인성시험

공 사 명 : 군산--부안제21공구

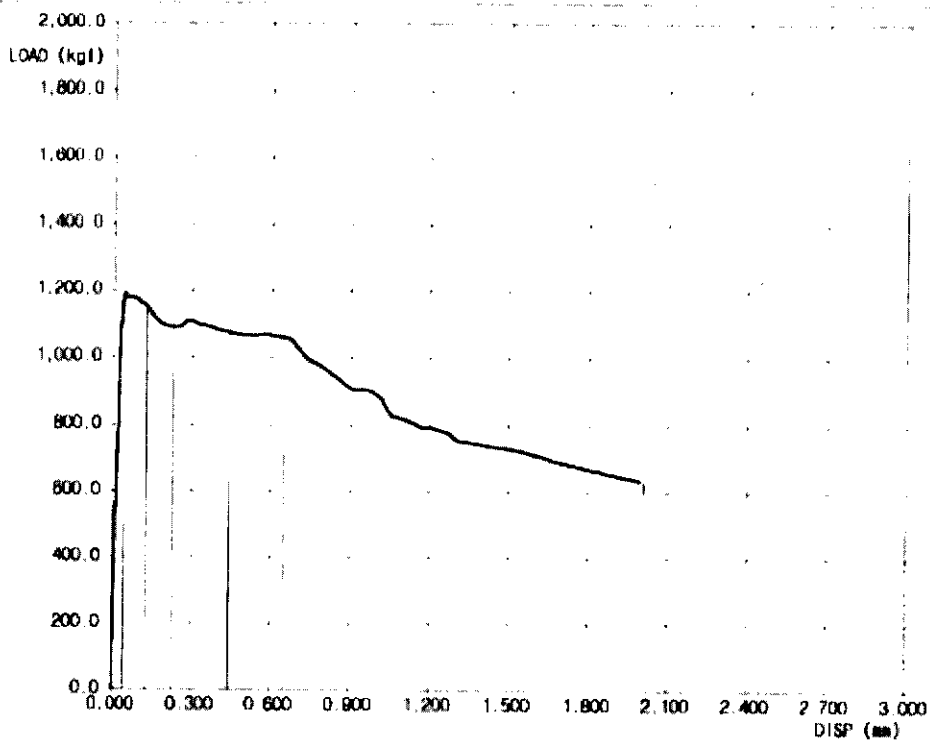
시험번호 : A-60035-001

시험일자 : 1999.03.29

시 료 명 : 배합설계용 S/C W/C=49%

제작일자 : 1999.02.26

채취위치 : 모래 (얕산)



시료 번호	C	15	10	20	30	15	10	20	30	R5_10	R10_20	R10_30	통과휨강도 kgf/cm ²	계수율 %
1	0.042	0.126	0.231	0.441	0.651	3.719	4.468	8.746	8.579	60.596	59.309	29.089	26.65	74.347

Remarks : W/C=49% HOT FIBER 40KG/M3

시 험 자 : 윤영덕

확 인 자 : 정상호

<그림 5-2> 등가휨강도시험

공 사 명 : 군산—무연제21골구

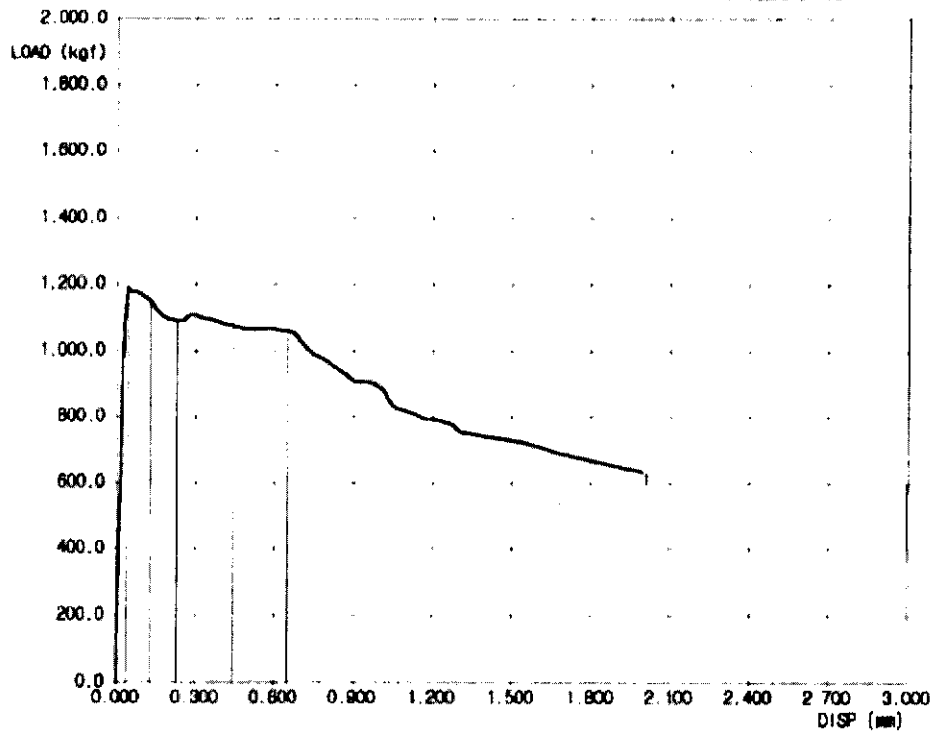
시험번호 : A-80035-001

시험일자 : 1999.03.29

시 료 명 : 배합설계용 S/C W/C=49%

제작일자 : 1999.02.26

채취위치 : 모래 (점산)



시료 번호	강면적 (kgf/m^2)	사형 (일)	폭 (cm)	두께 (cm)	지간 (cm)	최대하중 (kgf)	등가휨강도 (kgf/cm^2)	계수율 (%)
1	45	28	10	10	30	1,185.0	28.65	74.347

Remarks : W/C=49% HOT FIBER 40KG/MS

시 험 자 : 윤영덕

박 안 자 : 정성호

岩盤工學 이야기 (II)

토목설계팀 토목차장 이정완

2. 암반의 공학적 분류

2.1 서론

암반구조물을 안전하고 경제적으로 설계하고 시공하기 위해서는 대상 암반의 공학적 특징을 정확히 파악하여야 한다. 암반분류는 이러한 목적으로 실시하는 것으로 암반을 구성하는 암석의 강도나 풍화, 변질정도, 암반틈의 상태, 암반의 불균질성과 불연속성 등에 관한 사항을 현장에서 관찰, 조사하여 일정한 기준에 따라서 암반을 등급으로 나누어 구분하는 것이다. 이러한 암반분류는 도로, 터널, 댐 등의 토목·암반구조물의 건설 각 단계에 걸쳐 설계와 시공에 깊숙이 관여를 하게되며 이러한 암반분류의 결과는 구조물의 경제성과 안정성에 중대한 영향을 미치게 된다. 암반분류기준은 객관적이며 간편하며 대상으로 하는 모든 암반에 적용할 수 있어야 하며 구조물의 설계와 시공에 필요한 정보를 제공하여야 한다.

현재 암반분류는 ‘건설표준품셈’과 ‘지질조사품셈’에서 적용한 지반분류를 사용하고 있으나 국내 지반의 기초자료에 따른 검증이 미흡하고 공사종류, 시공난이도, 지반의 자립성과 대비에 대한 분류도 정립하지 않았기 때문에 발주처, 설계자, 시공자가 모두 사용할 수 있는 분류기준의 정립이 필요한 실정이며 각 층 암반분류방법의 적정요소를 비교하면 다음 [표 2-1]과 같다.

[표 2-1] 암반분류 적용요소의 비교

분류방법	분류기준요소	비 고
한국기술 용역협회	①시추추진상황, ②풍화변질상태, ③균열상태(육안), ④코아회수상태, ⑤항타타격시험, ⑥침수시험, ⑦탄성파속도, ⑧일축압축강도	탄성파속도 및 일축압축강도 이외에는 주관적인 견해가 지배적임.
서울 지하철 3,4호선 B팀	①탄성파속도, ②암질상태(육안), ③보링코아상태, ④지하수의 영향	NATM 시공중 감리의 기준임.
신갈-안산 고속도로	①일반적특성(육안), ②RQD, ③탄성파속도, ④일축압축강도	설계시에 조사 가능한 요소로 판별 기준으로 함.

호남고속도로 확장설계 (고서~순천간)	①육안으로 식별할 수 있는 일반적인 특성, ②RQD, ③탄성파속도, ④일축압축강도, ⑤지하수 상태	
토목표준품셈	①탄성파속도(자연, 암편) ②내압강도, ③암석종류	
한국통신	①RQD, ②일축압축강도, ③탄성파속도, ④절리와 충전물	통신구 기준
RMR 방법	①일축압축강도, ②RQD, ③절리의 간격, ④절리의 상태, ⑤지하수, ⑥절리의 방향	절리의 간격 및 상태, 방향 등 3요소를 경험적인 판단으로 가정하여야 함.
Q-system	①RQD, ②절리의 수, ③절리면의 상태, ④절리의 풍화정도, ⑤지하수, ⑥용력감소요소	터널시공시 육안으로 식별될 수 있는 요소로 판단함.
오스트리아의 암반분류	①암반의 특성(육안), ②암반의 거동, ③지하수	터널시공시 육안으로 식별될 수 있는 요소로 판단함.
일본국도터널 기준	①탄성파속도, ②지질상태, ③코아채취상태 ④관찰결과(균열상태 등)	탄성파속도 이외에는 육안판별 요소가 지배함.

2.2 암반분류의 문제점

국내에서 적용되고 있는 암반분류의 문제점을 다시 정리하면 다음과 같다.

- 1) 국내에서 적용되는 암반분류는 그 기준이 서로 상이하고 국내 암반에서의 기초자료에 의한 검증도 미흡한 실정이다. 또한 공사종류, 시공난이도, 지반의 자립성과의 관계도 정립되지 않은 상황으로서 발주자, 설계자, 시공자가 모두 함께 사용 할 수 있는 분류기준이 현재 없다.
- 2) 국내에서는 RMR, Q-system에 의한 암반분류법이 잘 알려져 있으나 각 항목의 평가방식이 경험적 판단이 요하게 되어 주관적 오류가 발생하는 경우가 많다. 동일 현장조건하에서도 조사자에 따라 크게는 50%까지 커다란 차이가 보인다는 발표도 있었다.
- 3) RMR 분류에서는 각 분류 인자의 특정치를 일정범위로 구분하여 평점을 부여하는 방식으로 인하여 정성적인 기준으로 제시된 절리면의 상태를 정량적인 수치로 환산하는 과정에서 오차가 많이 발생하고 있다.
- 4) 국내의 건설표준품셈에서의 암반분류는 지질품셈, ISRM(국제암반역학회)분류안, BSI 기준안에 대하여 암시험편의 일축압축강도가 너무 높은 경향을 보이며 탄성파속도와 맞지 않으며 실제 토사와 일축압축강도 300kg/cm^2 의

풍화암 사이에 분류되는 풍화토나 풍화암이 분류에서 제외되었으므로 실제 도심 굴착에서 가장 빈번히 나타나는 지반이 제외되었고 일축압축강도 시험편을 풍화암, 연암에서는 제작하기 어려우므로 일축압축강도는 가공의 수치로 판단되어진다.

- 5) 지질품셈의 경우 정적인 분류는 비교적 세밀하게 구분되고 있으나 암석의 일축압축강도 부분은 상당히 높은 강도로 규정되어 있으며 암반분류와 암석경연분류가 일치하지 않는다. 따라서 실무용으로 사용될 수 있는 암반분류의 조건은 다음과 같다.

- ① 객관적인 평가가 가능한 지표이어야 하며 범용적인 조사법과 시험법에 의하여 얻어진 지표이어야 한다.
- ② 지표는 평가대상과 관련이 있는 요소와 직결되어야 하며 분류의 등급구분은 설계나 시공의 표준패턴 구분과 대응되어야 한다.
- ③ 모든 사람이 납득 할 수 있는 것으로서 계약 또한 설계변경의 근거가 될 수 있어야 한다.

따라서 시공중의 주변암반에 대한 정확한 공학적 평가를 위해서는 보다 객관적으로 막장지질의 상태를 조사, 평가함으로써 주변지반의 특성을 파악할 수 있어야 하며 암반상태에 적절하게 시공함으로써 안정성을 확보하여야 한다. 이를 위해서는 시공시 급변하는 지질조건에 능동적으로 대처하여 시공을 할 수 있도록 암반평가를 포함한 종합적인 시스템 개발이 시급한 실정이다.

2.3 토사, 리핑암 및 발파암의 분류기준

사면의 절취시공을 할 경우 절취방법결정과 절취비용을 산출하기 위하여 절취난이도를 토층, 리핑암, 발파암으로 구별하고 있다. 절취의 난이도는 암석의 강도뿐만 아니라 불연속면의 발달 빈도에 따라 결정된다. 현장 암반의 탄성파전파속도는 암석의 강도와 관련되는 암석의 자체속도 뿐만 아니라 불연속면의 빈도를 포함하고 있으므로 현장 암반을 대상으로 하는 탄성파전파속도 측정은 굴착난이도 경계를 규명하는데 효과적인 방법이다. 암반의 경우에는 암석의 구성물질, 강도, 균열상태 등에 따라 전파속도가 변하여 이와 같은 특성으로 인하여 탄성파의 전파속도는 토공작업시 리퍼의 작업능력을 판단하는 기준이 되고 있다.

2.3.1 균열정도와 탄성파전파속도

토사, 리핑암, 발파암의 구분은 다음의 항목을 종합적으로 검토한 후 결정할 필요가 있다. 토사, 리핑암, 발파암의 구분은 시공성을 충분히 검토한 후에 다음과

같이 분류할 수 있다.

- ① 토사와 리핑암은 표준관입시험치(N치)가 50회/15cm 이상이면 리핑암으로 한다.
- ② 리핑암과 발파암은 암반의 굴착특성을 결정하는 불연속면의 발달빈도(TCR, RQD)와 탄성과 속도를 기준으로 <표 2-2>, <표 2-3>에 따라 구분한다.

[표 2-2] 불연속면의 발달빈도에 따른 리핑암과 발파암의 분류

구 분	리 핑 암		발 파 암	
	약한 암석인 풍화암, 연암, 보통암 중에서		강한 암석인 보통암, 경암, 극경암 중에서	
불연속면의 발달빈도	BX 크기	TCR = 5% 이하이고 RQD = 0% 정도	BX 크기	TCR = 10% 이하이고 RQD = 0~5%
	NX 크기	TCR = 20% 이하이고 RQD = 10% 이하	NX 크기	TCR = 20% 이하이고 RQD = 10% 이상
강 도	풍 화 암		경 암	

[표 2-3] 탄성과속도에 따른 리핑암과 발파암의 분류

암종그룹	탄성과속도 (m/sec)			비 고
	토 층	리핑암반	발파암반	
A 그룹	700 이하	700~1,200	1,200 이상	편암암, 사질편암, 석회암, 사암, 역암, 화강암, 섬록암, 안산암, 현무암, 녹색편암, 감람암 등
B 그룹	1,000 이하	1,000~1,800	1,800 이상	흑색편암, 셰일, 이암, 응회암, 집괴암 등

$$\text{주) TCR} = \frac{\text{회수된 코아길이}}{\text{전체 시추길이}} \times 100(\%) \quad \text{RQD} = \frac{\sum 10\text{cm이 상되는 시료절편}}{\text{전체 시추길이}} \times 100(\%)$$

탄성파는 일반적으로 고결도가 높은 암석에서는 전파속도가 빠르지만 균열이 많은 암반에서는 속도가 늦어진다. Ikeda(1969)는 암석의 균열정도를 알기 위한 균열계수를 다음과 같이 제안하였다. 균열계수는 현장의 탄성파속도와 동일 현장에서 측정한 균열없는 암석시험편의 탄성파 전파속도를 측정하여 다음식으로 구한다.

$$C_r = \left[\frac{V_2}{V_1} \right]^2 \quad \text{여기서, } V_1 : \text{균열이 없는 암석시험편의 탄성파전파속도}$$

V_2 : 원지반의 탄성파속도

균열이 작으면 $V_1 \approx V_2$ 로 되어 C_r 은 1.0에 가깝고 반대로 균열이 많으면, V_2

가 V_1 에 비하여 작게되어 Cr은 0에 가깝다.

토사, 리핑암, 발파암의 구분에 있어서 특히 주의하여야 할 지질은 [표 2-4]와 같다.

[표 2-4] 구분상 주의를 요하는 지질

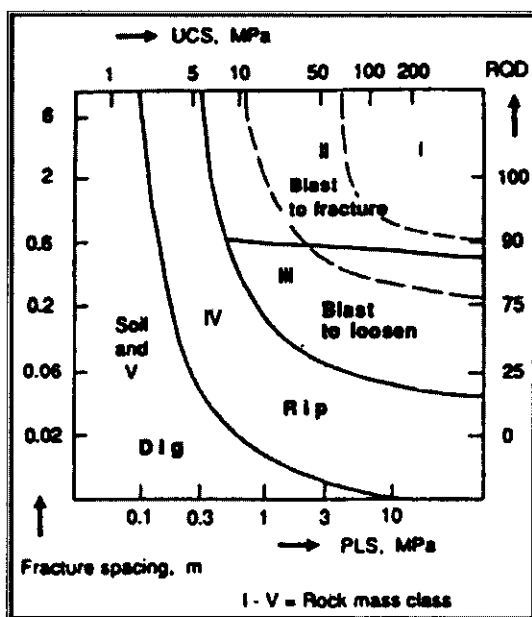
지 질 명	토질의 형태와 유의점
전석섞인 흙	N값에서는 관입불능으로 되는 것이 많다. 전석의 혼입율이 20%를 넘으면 가동율이 나빠져 연암이라 판정된다.
화강암류	풍화토로 된 것은 설계상 토사로 구분되나, 풍화부와 신선부의 경계부근의 것은 판별이 힘들어 시공시에 토사, 연암의 추정선이 변경될 때가 많다. 또 이 경계부근에서는 전석을 많이 포함하여 연암이라고 판정될 때가 있으므로 설계에 있어서 주의해야 하고 신선한 것은 대단히 굳다.
안 산 암 현 무 암	신선한 것은 설계상 경암이라 판정되나, 절리에 의한 균열이 발달한 것이나 풍화가 진행된 것은 시공시 굴삭능력에 의한 연암이라 판정될 때도 있으므로 주의한다.
응 회 암	암질이 연한 것이 많고 보링의 굴진능력이 좋고, 설계시에는 연암이라고 판정될 때가 많다. 그러나 신선하고 균열이 없는 것은 리퍼의 날이 듣지 않아 발파가 필요하며 경암으로 변경되는 것도 있으므로 설계에 있어서 충분한 검토가 필요하다. 풍화가 진행 된 것은 굴삭시에 암의 상태를 띄는 것, 포설 및 전압으로 쉽게 토사화되는 것이 있으므로 연암의 자세한 구분에 있어서는 주의를 요한다.
역 암	역암은 함유되는 자갈의 크기나 양, 고결의 정도에 따라 정도가 크게 변화된다. 일반적으로 풍화의 영향을 받기 쉽고 풍화가 진행된 것은 설계상 토사로 판정된다. 또 신생대 제3기 이후의 것은 반고결 상태로 되어 있는 것이 있어 굴삭도 용이하다. 분포상태는 세로방향의 연속성이 희박하고, 좁은 범위로만 퇴적되어 있을 때가 있으므로 조사에서 주의해야 한다.
이암 · 점판암	이암은 풍화의 영향을 받기 쉬운 것이 많다. 신선한 것은 설계시에 경암이라 판정되는 것도 시공시에 공기나 햇빛에 급속으로 풍화가 진행되어 시공능률이 좋아 연암이라 판정되는 것도 있으므로 주의한다. 점판암은 일반적으로 굳지만, 총리방향으로 얇게 벗겨지는 성질이 있어 시공능률이 좋아 연암이라 판정되는 것도 있다.

2.3.2 굴착의 난이도 결정

굴착시공을 할 경우 굴착방법과 비용 등을 결정하기 위하여 굴착난이도를 토사(Digging Soil), 리핑암, 발파암 등으로 구분한다(그림2-1).

이 분류기준은 굴착대상 암반내의 절리간격과 현장에서 간단히 측정할 수 있는 Schmidt hammer에 의한 일축압축강도 또는 점하중시험기(Point load tester)에

의한 점하중 강도를 이용한 분류방법이다. 절리간격과 강도의 관계에 따라 암반을 인력에 의한 굴착(Dig)이 가능 암반, 기계굴착(Rip)이 가능한 암반, 발파에 의해 붕괴(Blast to loosen)되는 암반, 발파에 의해 균열(Blast to fracture)이 발생하는 암반 등 크게 4가지로 분류하고 있다.



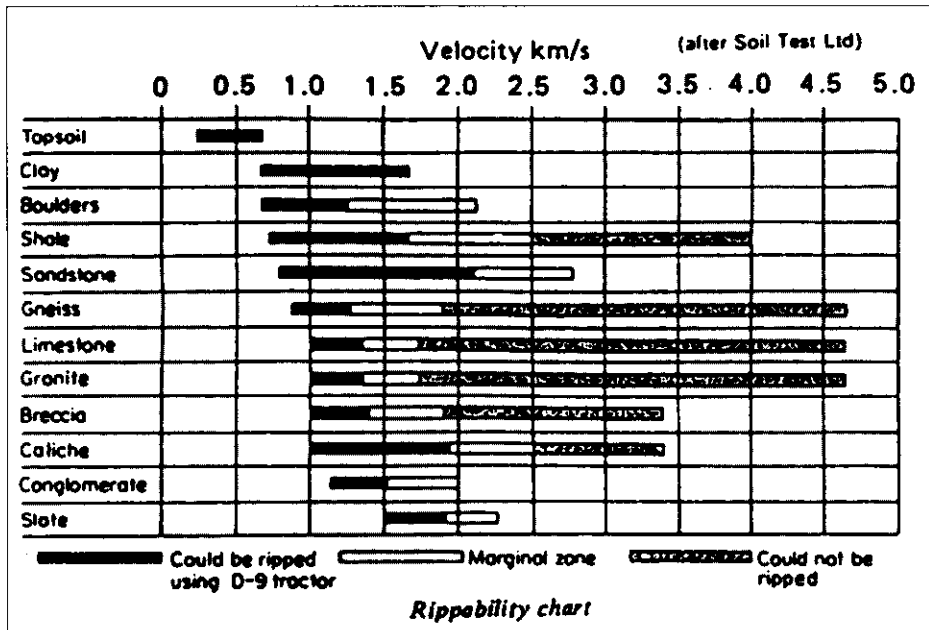
<그림 2-1> 토공작업의 난이도 결정(Franklin and Broch, 1972)

예를 들어 일축압축강도가 $1,700 \sim 2,100 \text{ kg/cm}^2$ 이고 절리간격이 $20 \sim 50 \text{ cm}$ 일 경우에는 발파작업에 의한 굴착이 가능한 암반으로 평가할 수 있다. 이 방법은 현장에서 간편하고 용이하게 비교적 합리적으로 암반분류를 할 수 있는데 좀더 세분화한 분류가 필요할 때는 탄성파전파속도를 고려한 분류기준을 추가로 사용하면 된다. 굴착난이도의 실시절계는 암반강도 및 불연속면의 상태를 고려하여서 설계되어야 하나 일반적으로 암석의 강도만을 고려하여 설계하고 있는 실정이다.

한편 풍화암이나 연암을 Ripper로 굴착할 경우 Ripper로 굴착할 수 있는 지의 척도를 Rippability라고 하고 그 측정에는 탄성파속도가 사용된다. 이 Rippability를 <그림 2-2>에 나타내었다. [표 2-5]는 외국에서 사용하고 있는 리핑작업 가능 정도를 나타내고 있다. 리핑굴착 및 각종 굴착범위를 탄성파속도를 기준으로 제시하고 있다. 또한 암반 강도와 경도, 불연속면의 상태에 따른 굴착특성을 [표 2-6]에 나타내었다.

국내 암반등급 기준과 굴착공법(토목품셈)에 따르면 리핑작업의 경우 자연상태

의 탄성파속도가 1,800m/sec 이하의 암반은 리핑작업이 가능하고 1,800m/sec 이상인 암반에서는 발파작업을 시공할 수 있다고 규정하고 있다. 국내에서 절취공사시 사용되는 암반분류 기준의 하나는 다음 [표 2-7]과 같다. Weaver(1975)가 제안한 Rippability 평점표를 [표 2-8]에 나타내었다.



<그림 2-2> 탄성파전파속도와 32t 불도저의 Rippability

[표 2-5] 리핑작업 난이도 (Excavation handbook, 1981)

탄성파속도 기준(Ripper)	V _p (m/sec)					
		500	1,000	1,500	2,000	2,500
중형트럭-Ripper 27~45톤급 (200~300HP)	Ripper 불필요	용이	보통	곤란	매우 곤란	발파굴착 또는 발파
대형트럭-Ripper 45~72톤급 (300~525HP)	Ripper 불필요	용이		보통	곤란	매우 곤란
						발파굴착 또는 발파

[표 2-6] 암석의 경도 및 강도에 의한 분류

A. 굴착특성

암석의 경·연	구 별 기 준	일축압축 강도 (kg/cm ²)	탄성파 전파속도 (m/s)	굴착특성
극연암 (Very soft rock)	Material crumbles under firm blows with sharp end of geological pick; can be peeled with a knife; too hard to cut a triaxial sample by hand. SPT will refuse. Pieces up to 3cm thick can be broken by finger pressure.	17~30	450 ~1,200	Easy ripping
연암 (Soft rock)	Can just be scraped with a knife; indentations 1mm to 3mm show in the specimen with blows of the pick point; has dull sound under hammer	30~100	1,200 ~1,500	Hard ripping
경암 (Hard rock)	Cannot be scraped with a knife; hand specimen can be broken with pick with a single firm blow; rock rings under hammer	100~200	1,500 ~1,850	Very hard ripping
극경암 (Very hard rock)	Hand specimen breaks with pick after more than one blow; rock rings under hammer	200~700	1,850 ~2,150	Extremely hard ripping or blasting
극경암 (Extremely hard rock)	Specimen requires many blows with geological pick to break through intact material; rock rings under hammer	>700	>2,150	Blasting

B. 절리간격에 의한 분류

절리간격구분	절리간격(mm)	암반등급	굴착특성
Very close	< 50	Crushed/Shattered	Easy ripping
Close	50~300	Fractured	Hard ripping
Moderately close	300~1,000	Block/seamy	Very hard ripping
Wide	1,000~3,000	Massive	Extremely hard ripping and blasting
Very wide	> 3,000	Solid/sound	Blasting

[표 2-7] 국내에서 사용되는 암반분류기준

구 분	암 석			암석과 토층의 중간	토 층
국내에서 사용되는 지반분류	극경암-경암	경 암	보통암+연암	풍화암	마사토
국제적으로 통용되는 지반분류	F (Fresh)	SW (Slightly weathered)	MW (Moderately weathered)	HW (Highly weathered)	CW/RS (Completely weathered /Residual Soil)
일축압축강도 (kg/cm ²)	1,250~2,600	1,000~1,700	600~1,200	350~550	
	우리나라 화강암에 대한 압축강도 범위임.				
굴착난이도	발 파 암 (Blasting Rock)			리 핑 암 (Ripping Rock)	토 층 (Digging Soil)
도로공사 “도로설 계요령”의 사면절 취구배(각도)	1 : 0.3 (73°)			1 : 0.5 (63°)	1 : 1.2 (42°)
도로공사 중부 고속도로사면 절취구배(각도)	1 : 0.5 (63°)			1 : 1 (45°) 높이 6m 이하 사면	1 : 1.2~1.5 (34°)~(40°) 높이 6m 이상 사면

2.4 결론 및 제언

시공단계에서 수행하여야 할 사항과 주의사항은 다음과 같다.

2.4.1 절취면에서 지질조사 및 안정성

최종굴착면에서의 지질조사로서, 일반적으로 절취사면을 설계시에 시추지질조사 자료로서 기본설계와 실시설계를 이행함으로서 더 이상의 지질조사가 필요없고 다만 기존에 설계대로 굴착시공을 수행하였는가에 대한 여부만을 발주청의 감독관과 감리단계에서 감독하는 경향이 있다. 그러나 국부적인 몇 地點에서 수행한 지질조사 자료로서는 복잡한 지반의 변화(암석의 풍화상태, 불연속면의 분포 및 발달특성)를 충분히 판단하는 것은 불가능하므로 그 시추자료에 근거하여서 작성된 기본 및 실시설계는 애당초 미흡할 수밖에 없다는 한계성을 인식하고, 설계단계에서 가정한 지반상태가 최종굴착면에서의 지반상태와 같은가 다른가를 다시

[표 2-8] Rippability 등급분류표 (Weaver, 1975)

암반등급	I	II	III	IV	V
등 급	Very good rock	Good rock	Fair rock	Poor rock	Very poor rock
탄성파속도 (m/s)	> 2,150	1,850~2,150	1,500~1,850	1,200~1,500	450~1,200
점 수	26	24	20	12	5
Rock hardness	Extremely hard rock	Very hard rock	Hard rock	Soft rock	Very soft rock
점 수	10	5	2	1	0
풍화정도	Unweathered	Slightly weathered	Weathered	Highly weathered	Completely weathered
점 수	9	7	5	3	1
절리간격(mm)	> 3,000	1,000~3,000	300~1,000	50~300	< 50
점 수	30	25	20	10	5
절리연속성	Noncontinuous	Slightly continuous	Continuous~no gouge	Continuous~some gouge	Continuous~with gouge
점 수	5	5	3	0	0
Joint gouge	No separation	Slightly separation	Separation < 1mm	Gouge < 5mm	Gouge > 5mm
점 수	5	5	4	3	1
Strike & dip orientation	Very unfavorable	Unfavorable	Slightly unfavorable	Favorable	Very favorable
점 수	15	13	10	5	3
총 점 수	90~100	70~90	50~70	25~50	< 25
Rippability 평가	Blasting	Extremely hard ripping and blasting	Very hard ripping	Hard ripping	Easy ripping
Tractor 선택	-	DD9G/D9G	D9/D8	D8/D7	D7
Horsepower	-	770/385	385/270	270/180	180
Kilowatts	-	575/290	290/200	200/135	135

주 : 1) 주향과 경사방향에 따라 Rippability 평가는 달라진다.

2) 75이상의 점수는 pre-blasting 없이는 굴착할 수 없는 것으로 간주하여야 한다.

확인하여서 만약 기존 설계방법이 위험하다고 판단되면 재굴착하거나 적절한 보완대책(Feed back)을 수립하는 것이 필요하다. 그러나 이 단계에서의 지질조사가 현장에서의 감독자와 감리자의 이해부족으로 인하여 간과되고 있는 경우가 많다.

기존의 절취면의 안정성을 분석하고 보강대책을 세우는 경우에도 본 절취면 지질조사 방법과 같이 직접 수행하면 된다. 그러나 절취면 지질조사의 경우에 시추조사를 수행하는 경우가 간혹 있는데 이런 것은 특별한 경우가 아니면 불필요한 낭비이다. 절취면상에서 3차원적으로 지질상태를 판단할 수 있는데 무엇 때문에 시추조사가 더 필요한 것인가?

최근에는 절취면 공사를 끝낸 후에 조경목적에서 절취면 표면에 보편적으로 녹화처리를 수행하므로 차후에 절취면상에서의 지질상태를 판단할 수가 없는 경우가 많다. 그러므로 공사가 끝난후 절취사면의 장기적인 유지·보수시에 기본자료로서 활용할 수 있도록 최종 절취면상에서 수행한 정밀 지질조사 자료를 작성·보관해야 한다.

2.4.2 절취면에서 암판정

최종굴착면에서 암판정을 수행할 경우에 감독자(감리자)와 시공자간에 분쟁이 종종 발생하므로 토공물량의 산정을 위한 합리적인 암판정 방법이 필요하다. 기존의 암판정 기준이 불합리하고 미흡한 점들이 많은데, 무엇보다도 암판정 방법은 岩石(強度) 判定방법과 岩盤 判定방법으로 나누어서 고려하여야 암판정에 따른 혼돈을 방지 할 수 있음을 이해하여야 한다.

현장탄성파탐사 방법이 굴착난이도 경계를 분류하는 비교적 합리적인 방법이다. 그러나 현장탄성파탐사가 용이하지 않은 경우에는 차선택으로 암반절취상에서 암석강도와 절리발달빈도를 다음과 같이 측정한다.

1) 암석강도를 우선적으로 고려 : (岩盤(強度)判定)

암절취면에서 2~3m 간격으로 슈미트해머로 타격하여 풍화암, 연암, 경암에 상응하는 슈미트해머 수치를 서로 연결하여서 암석의 강도분포도를 작성한다. 여기서 파쇄정도를 고려하지 않는 암석자체를 볼 때 리핑가능한 암석강도는 건조상태일 때 슈미트해머 수치가 25(화강암의 압축강도는 350~600kg/cm²) 이하의 암석이고 그 이상은 연암이상의 발파암석이다. 건설표준품셈의 「암분류기준」에서 제안하는 연암의 압축강도 하한선은 700kg/cm²(SHV=약30~40)로서 굴착난이도를 위한 풍화암과 연암(화강암일 경우)의 판정기준으로서 너무 높은 기준으로 판단된다.

2) 절리발달빈도 : 굴착작업의 효율성(능률)도 고려 :

슈미트해머 수치가 20~25인 경우의 비교적 강도가 센 풍화암은 암석이 손힘으로 어렵게 깨질정도의 풍화암석인 경우인데, 암반내에 절리의 발달이 많은 편이면 리핑암이나, 절리의 발달이 미약하면 리핑작업의 효율(능률)이

떨어지므로 발파로 굴착작업이 요망된다. 또한 슈미트해머 수치가 25~35인 비교적 강도가 약한 연암이라도 파쇄가 극심하면(3~5cm 절리발달 빈도) 굴착시공 가능상태를 고려하여서 리핑암으로 간주되어야 한다.

일반적으로 발파암은 슈미트해머 수치가 25 이상인 연암(절리가 보통 있는 경우) 이상에서 적용되고, 발파암중에서 특별히 강도가 센 슈미트해머 수치가 48~50 이상(상관되는 일축압축강도 1200~1250kg/cm² 이상)되는 경우에는 보통암/경암으로 분류된다.

3) 굴착작업의 施工性도 역시 고려 : (岩盤判定)

지표면 하부에 암석이 풍화토/암으로 둘러싸인 핵석풍화 절취면인 경우에는 현장에서 암판정하기에 가장 곤란한 경우로서, 굴착난이도를 굴착효율성 뿐만아니라 굴착시공성(workability)을 감안하여야 한다. 즉, 굴착시공이란, 토층내에 핵석이 군데군데 돌출하는 경우에 핵석이 집단적으로 모여서 분포하면 (TCR% > 20%) 그 핵석들을 Group으로 묶어서 발파암반으로 분류하고, 핵석이 적은 암체로 산발적으로 돌출하면 (TCR% < 10-20%) 전체적으로 리핑작업할 때 작은 핵석은 포함되어서 굴착가능하므로 리핑암반으로 판정한다. (핵석이 도출되는 풍화단면에서는 육안으로 볼 때 풍화토/암이 대부분(80% 이상)) 이중에서 TCR% = 20-70%이면 굴착난이도는 발파암이지만 절취구배는 발파암 주변의 풍화암/토의 구배를 따르고 TCR% > 70-80%이면 발파암으로서 암석구배를 따르는 것에 주의하여야 한다.

인천국제공항 여객터미널 Lift-up 공법 적용사례

인천국제공항 여객터미널현장 현장소장 이만영
건축과장 윤순웅

1. 개요

김포공항이 1958년에 국제공항으로 지정된 이후 우리나라의 경제발전에 따라 급증하는 항공수요의 대부분을 담당하는 관문의 역할을 하여 왔으나 1980년대에 들어오면서 국가경제발전의 급신장과 국민생활수준의 향상, 1989년도의 해외여행 자유화조치, 복수민항공시대의 개막과 더불어 국제선은 연평균 13%, 국내선 여객은 30% 이상 증가하는 등 두드러진 항공수요의 증가율을 기록하였다. 이러한 추세 속에서 김포공항의 확장공사를 추진해 왔으나 94년 당시 이미 그 처리능력의 90%에 달하게 되어 새로운 공항을 계획하게 되었으며, 앞으로 세계의 물류 흐름이 항만중심에서 공항중심으로 이동해 감에 따라 어느 국가의 공항이 중심(HUB)으로서 등장하느냐에 국가의 성패가 달려 있게 되었다.

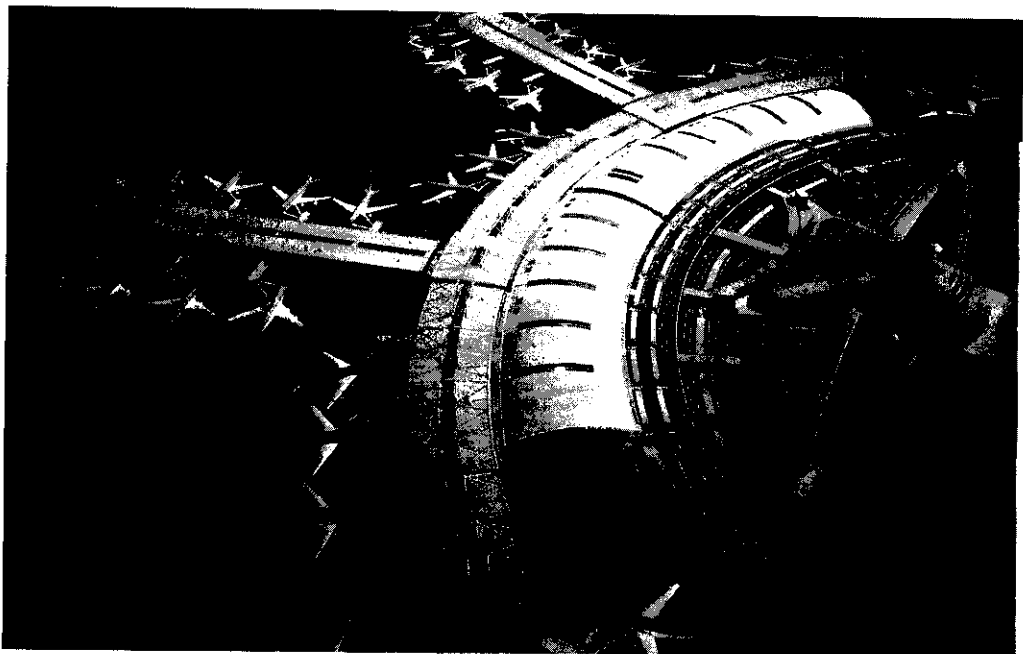
그 구체적 계획으로 건설되는 인천 국제공항은 1,435만평의 부지에 길이 4000m에 이르는 활주로 4개를 계획하고 있으며, 최첨단의 위성항해시스템(CNS/ATM)을 도입 설치하여 완벽한 항공보안시설체제를 구축하고, 시정거리 50m에서도 안전이 착륙이 가능한 CAT-Ⅲ b 등급으로 격상 운영함으로서 결항률은 0.2%이하로 감소하게 되는 전천후 공항으로 운영될 계획이다.

신공항 여객터미널은 터미널 1과 터미널 2 및 4개의 탑승동으로 구성된 탑승동 분리식 중앙집중형 배치구조로 이루어져 있고, 터미널 1은 길이 1,150m, 너비 163m, 높이 34m이며 지상 4층, 지하 1층으로서 총 면적은 290,000㎡이며 46개의 탑승구와 16개의 주기장(Hardstand)이 위치하는데 이중 43개의 탑승구는 국내선용으로 이용된다. 최종단계가 완성되면 총 155개의 탑승구를 갖추게 되어 연간 1억명의 여객을 처리할 수 있게 된다.

건물의 기본적인 형태는 유연함과 부드러운 인상을 풍기도록 곡선의 사용을 주제로 삼아 힘차게 솟아 우뚝 서 있는 기둥과 이들을 연결하고 있는 철선들의 강약이 어우러져 팽팽한 긴장감을 고조시키면서 방문객이나 여행자들에게 시각적인 절정을 이루게 한다. 자연환경에 조화되는 입면과 한국적인 지붕선의 도입, 그리고 장스판의 철골 트러스와 Cable 구조의 채택은 자연의 형상을 유추하고 선박의

이미지를 실는데 결정적인 디자인 구성요소가 되며, 장스판의 Main Roof Truss 로 이루어지는 출발층은 거대한 Open Space 를 구성하면서 세계를 향한 관문이라는 인식을 심어주게 된다.

공 사 명	인천국제공항 여객터미널 공사
발 주 처	수도권 신공항 건설공단
위 치	인천광역시 중구 운서동 일원
건축면적	141,359.29 m ² (42,834.33 평)
연 면 적	434,000 m ²
건물규모	길 이 : 1,049m 최고높이 : 33.09m (처마높이 27.3m) 폭 : 149m
구 조	지 붕 : 트러스 + 셀철골 구조 바 닥 : R.C + Deck Plate 위 콘크리트 슬라브 기 초 : 강관파일 + 독립기초
공사기간	1996 년 11 월 20 일 - 1999 년 9 월 30 일



<그림 1-1> 조감도

2. 적용 배경

2.1 적용 동기

인천 국제공항의 심장부 역할을 하게 될 여객터미널의 주요 공정이 될 6400ton의 Roof Truss 구조물을 시공함에 있어서 공기와 비용을 절감하면서 안전과 품질을 최대한 확보하기 위해 최신공법인 Lift-up 공법을 이용한 건축물을 계획하게 되었다.

- Lift-up 공법 적용 배경

- ① 지상에서 조립해서 상판을 Lifting 하는 공법이므로 효과적인 시공과 검측이 이루어 질 수 있으므로 품질혁신에 기여할 수 있다.
- ② 고소 작업이 적으므로 안전을 확보할 수 있다.
- ③ TIA × 1, T1 × 6 의 구조가 모듈화 되어 있는 점을 최대한 이용한다.
- ④ 기존 비계 방식으로 시공할 경우 주변의 공사 여건 때문에 장비의 진입과 운용에 많은 비용과 노력이 소요된다.
- ⑤ Roof Truss 상판과 주변의 Column 이 Pin 구조로 되어 있기 때문에 상판을 Lift-up 하면서 Column 도 동시에 Lifting 하여 별도의 Column 설치 계획을 세우지 않아도 된다.
- ⑥ 국내 최초로 Lift-up 공법을 건축물에 적용한 경험이 있는 한진건설의 기술력과 Know-How 를 이용한다.

이러한 배경아래 이루어지는 여객터미널의 Roof Truss 의 Lifting 은 21 세기 동아시아의 핵심이 될 인천 국제공항의 여객터미널을 한층 더 의미 있게 할 것이다.

2.2 Lift-up 공법의 개요

“Lift-up 공법”은 지상에서 조립한 구조체를 미리 시공한 본기둥 또는 가설기둥을 반력기둥으로 하여 소정의 위치까지 유압잭 등을 이용하여 양중, 설치하는 공법으로서 1913 년 미국에서 최초로 고안되었다. 일본에서는 1963 년 竹中工務店이 奉成光學 기숙사 건설에 와세다 대학과 공동개발로 Lift-up 공법을 실시한 것이 최초이다. 현재에는 공법의 발전과 개선을 통하여 체육관에서부터 공장, 정비고, 전파수신용탑, 교량에 이르기 까지 그 적용범위가 넓고, Lift-up 공법은 기존 공법에 비해서 다음과 같은 장점이 있는 것으로 평가되고 있다.

- ① 시공성 향상 - 지상에서 작업을 하기 때문에 작업조건이 양호하여 작업능률 및 시공성을 향상시킬 수 있다.

- ② 품질확보 - 부재의 검사업무가 수월하여 원하는 품질확보가 용이하다.
- ③ 안전성 확보 - 고소작업의 감소로 높은 안전성을 확보할 수 있다.
- ④ 공사비 절감 - 가설비계 및 중장비 절감으로 공사비를 줄일 수 있다.
- ⑤ 공기 단축 - 시공성 향상으로 동일한 투입조건하에서 공기 단축이 가능하다.

2.3 Lift-up 공법 적용시 고려사항

Lift-up 공법을 적용하는 구조물은 대개가 장스팬이고, 중량물이기 때문에 Lift-up 중에 다음과 같은 사항을 주의하여야 한다.

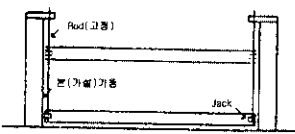
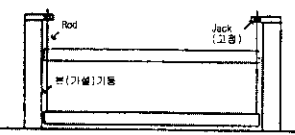
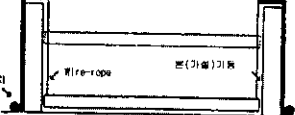
- ① Lift 시에 하중의 불균형에 의한 부재의 변형이 발생할 우려가 있으므로, 그 한계치를 예측하고 하중이 등하게 분포할 수 있도록 하여야 한다.
- ② 풍력 등에 의한 수평력에 견딜 수 있도록 가설지지물의 설치를 검토하여야 한다.
- ③ Jack System 의 안전성을 확인하여야 한다.

2.4 Lift-up 공법의 종류

(1) 반력기둥 형식에 의한 분류

반력기둥 형식		공 정 순 서 도		
①	본기둥 방식			
②	가설기둥 방식			
③	본기둥+가설기둥 병용방식			
④	본기둥순차완성 방식			

(2) Lift-up 장치 형식에 따른 분류

Lift-Up장치 형식	설 명	도 면
① Rod고정식	기둥의 상부로부터Rod를 늘어뜨려 지붕에 설치한 잭이 Rod를 따라 올라가는 방식	
② Jack고정식	기둥상부에 잭을 고정하고 이 잭에 의해 Rod와 지붕을 끌어올리고 남은 Rod를 상부에서 순차적으로 제거해 가는 방식 Rod대신에 PC강선 사용가능	
③ Climbing식	Rod를 사용하지 않고 지붕에 설치한 잭이 본설기둥을 타고 올라가는 방식	
④ Wire-Rope식	잭이나 Rod를 사용하지 않고 Wire Rope를 사용하여 지붕을 원치로 상승시키는 방식	

이상과 같이 Lift-up 공법은 반력기둥 및 Lift-up 장치의 형식에 의해 분류할 수 있지만, 구조물의 종류, 규모, 구조 등에 따라 각각을 조합시켜 적절한 방법으로 개량되어 시공하는 것이 통례이다.

(3) 당 현장 적용공법 분류

- 반력기둥 형식 - 가설기둥 방식
- Lift-up 장치형식상의 분류 - Jack 고정식

2.5 국내외 시공사례

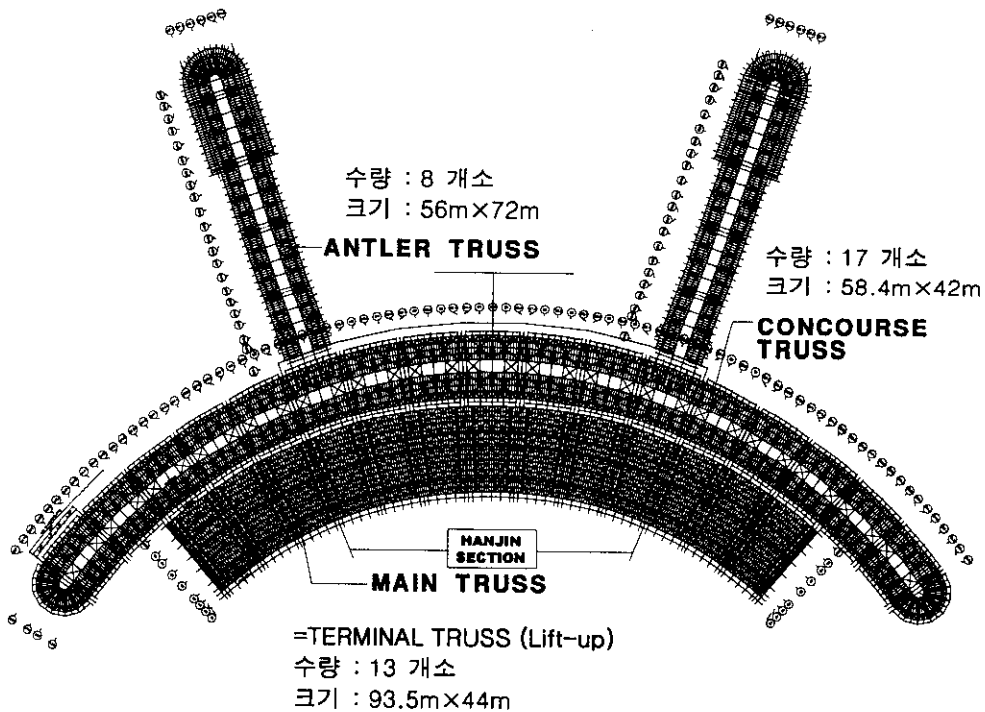
국내에서는 성수대교 해체시의 Lowering Lift (중량:4600ton, 하강거리:16m), 서강대교의 Arch Section Lifting 등 교량과 조전소 Deck Lifting 등에 적용한 예와 김포공항의 대한항공빌딩 등에 적용한 예가 있다.

[표 2-1] 국내외 Lift-up 시공사례

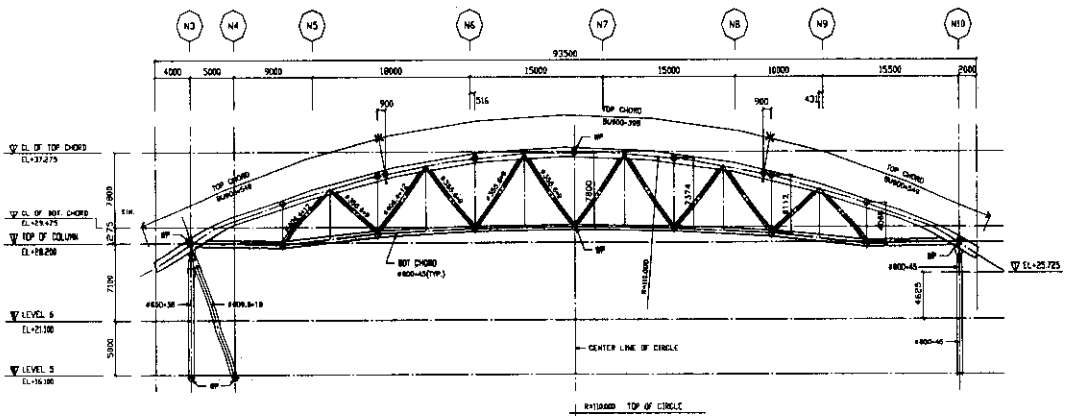
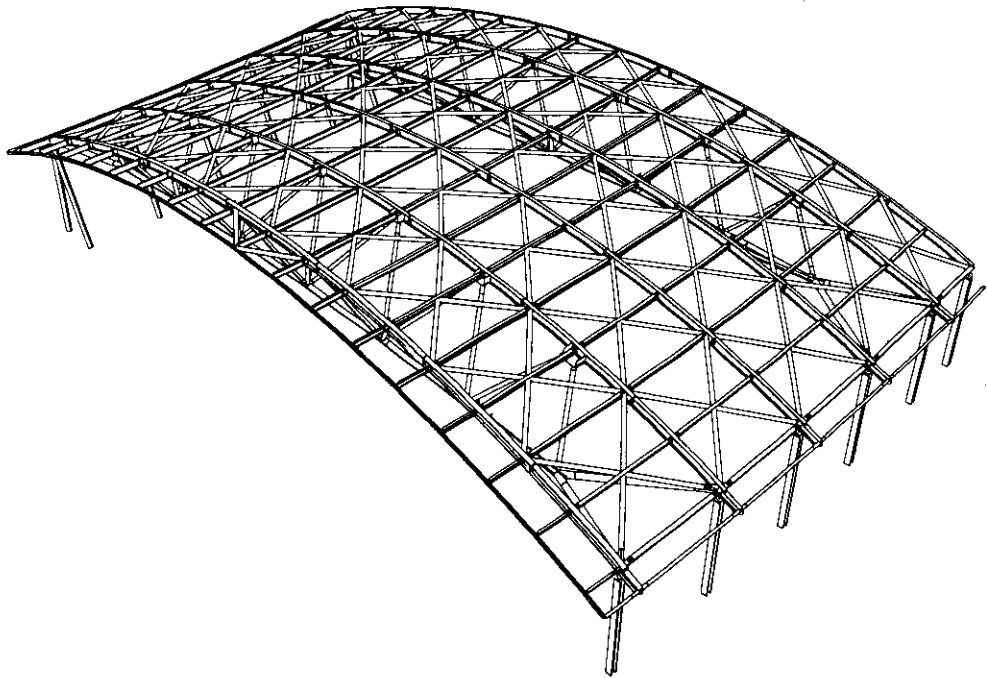
명칭	규모	Lift 중량(ton)	완공일	Lift 높이	국가
나고야 돔	직경 187.2	10,300	1997.2	24.77	일본
하네다공항 정비고	193.2× 96.6	6,000	1993	28	일본
선돔福井	직경 116.1	4,400	1995.3	47.5	일본
Evergreen 정비고	164× 77	4,300	1993	29	대만
Royal Pavilion 정비고	235× 100	3,500	1993	25	브루나이
서강대교	150× 30× 34	2,400	1995	12	한국
대한항공빌딩	180× 90× 16.4	3,600	1997.3	28	한국
인천국제공항청사	96× 58× 1ea 93× 51× 6ea	1,335× 1ea 910× 6ea	1999.6	18	한국

3.시공계획

3.1 ROOF TRUSS PLAN

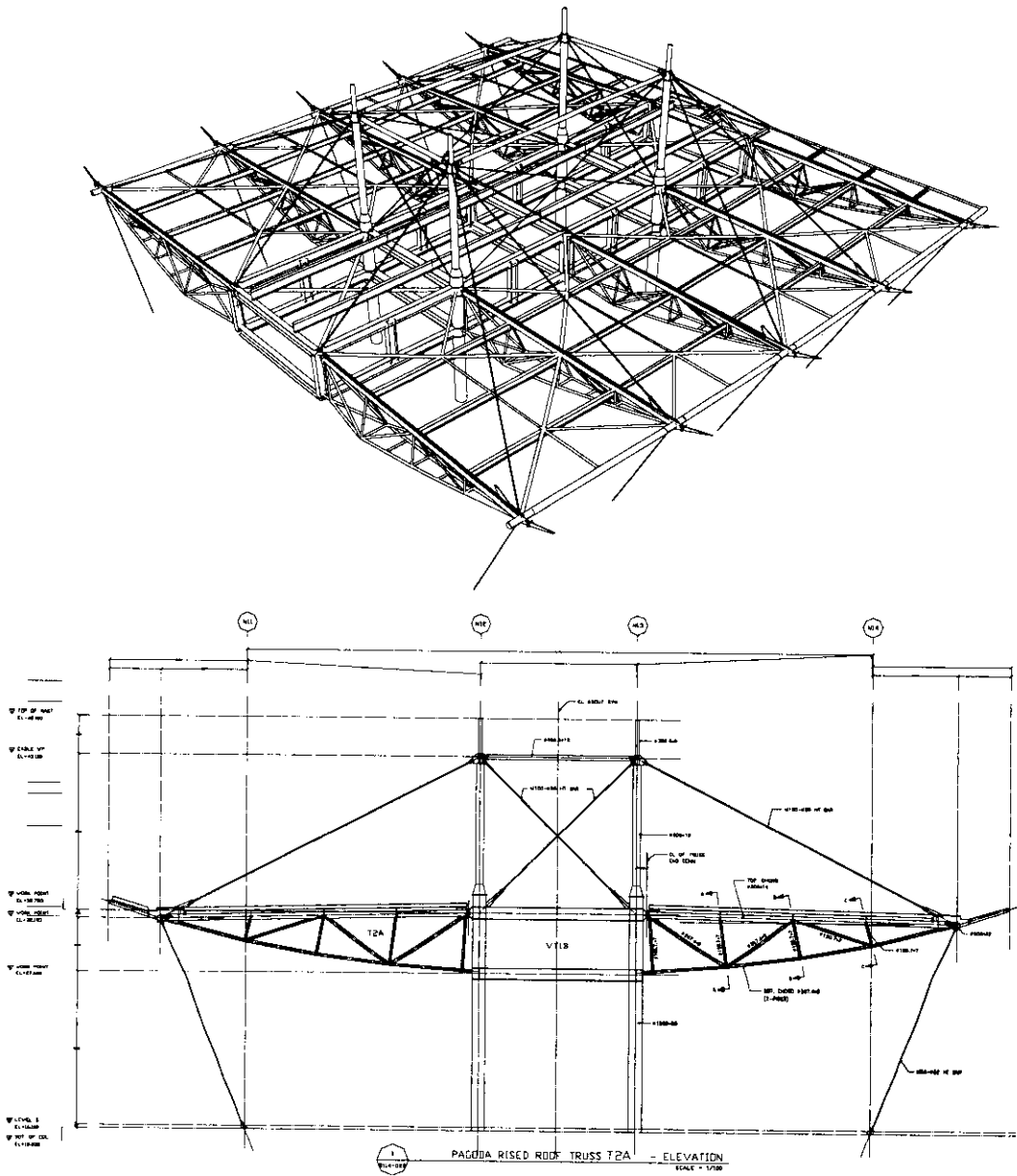


3.2 TERMINAL TRUSS DETAIL



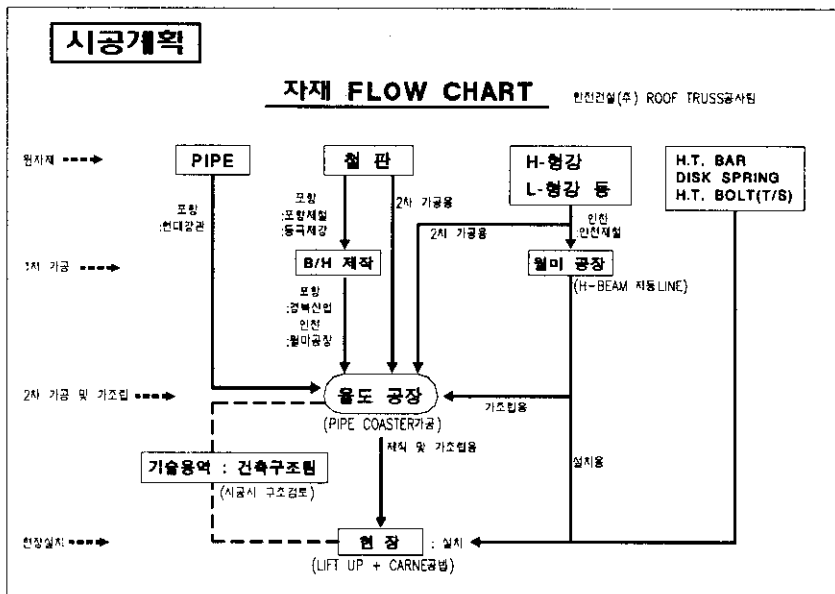
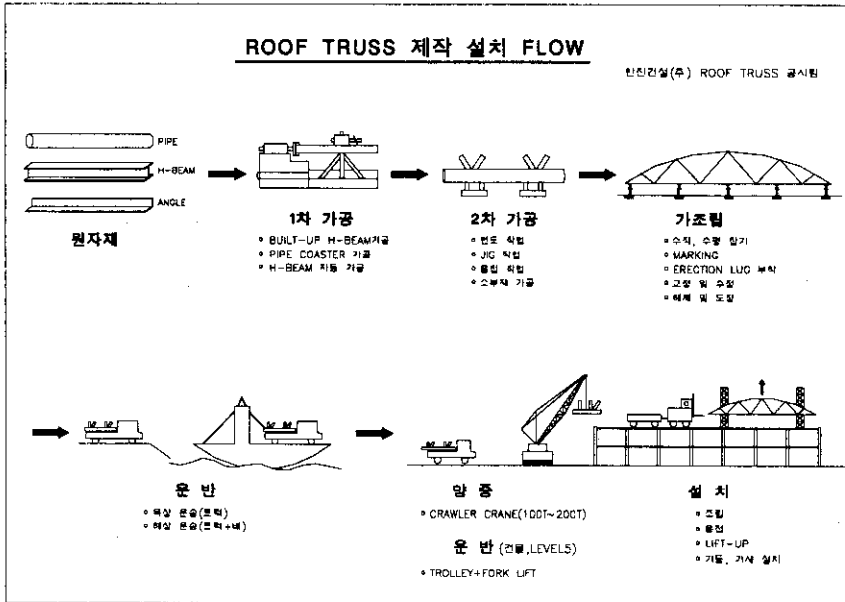
T1	부재명	PCS	TON	용접 POINT	볼트	비고
	TOP	35	270	35	T / S BOLT	
	BOTTOM	22	144	30		
	DIAGONAL	48	36	96	H / T BOLT	
	BEAM	314	262	16		
	기타	206	122	-		
	TOTAL	625	835	177		

3.3 CONCOURSE TRUSS DETAIL

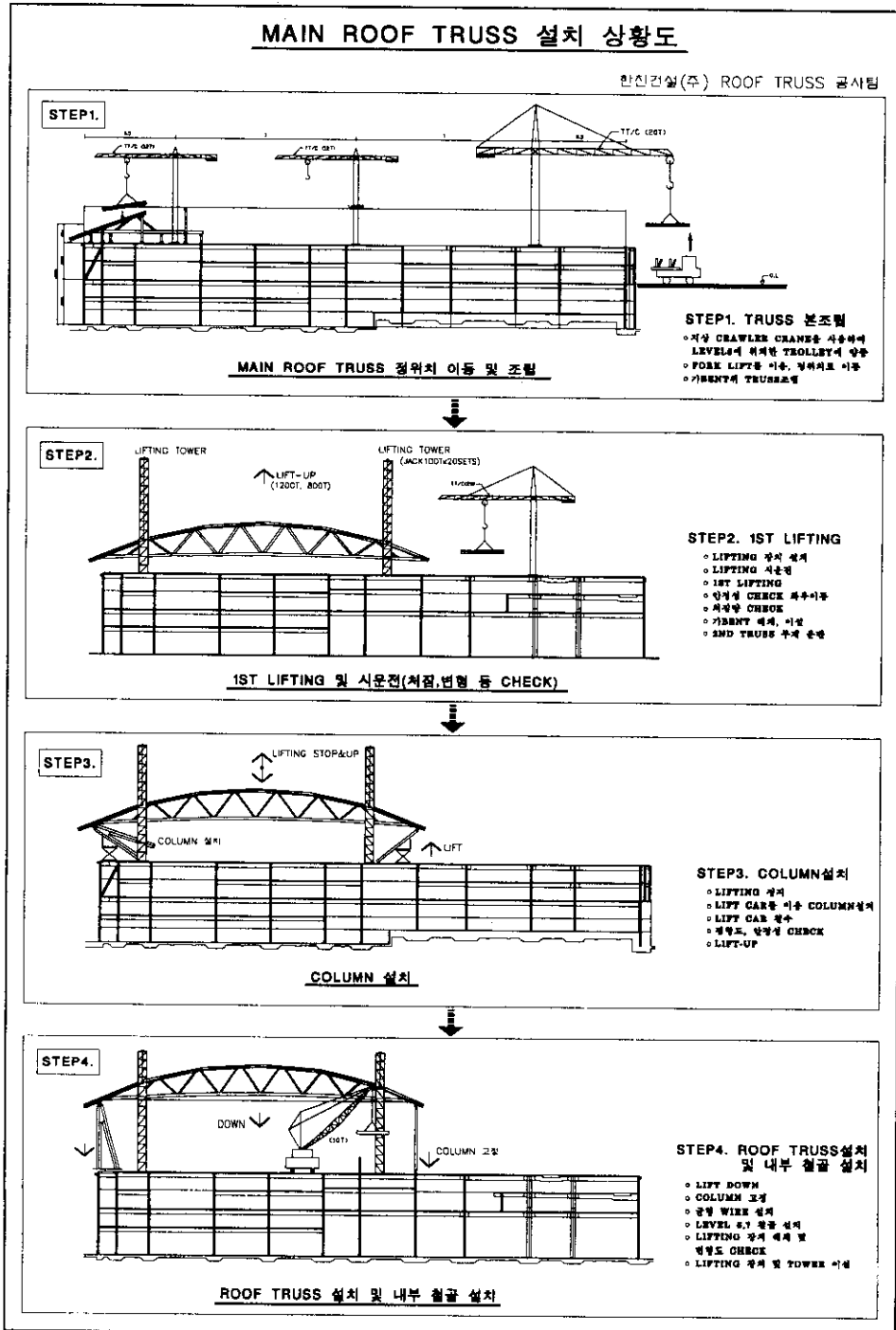


	부재명	PCS	TON	용접 POINT	볼트	비고
T2-A	VIERENDEE	45	185	62		
	WING	10	156	20		
	BEAM	214	143		242	
	기타	247	176			
	TOTAL	516	660	82	242	

3.4 제작, 반입, 설치 계획

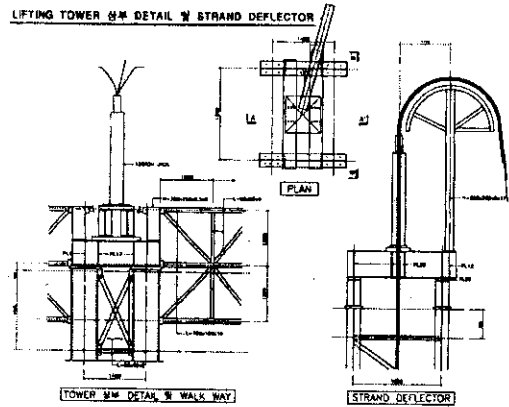
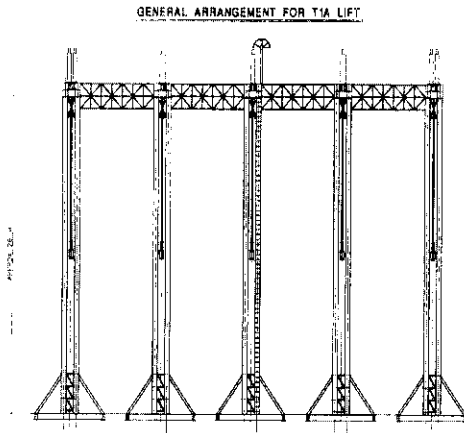


3.5 설치상황도

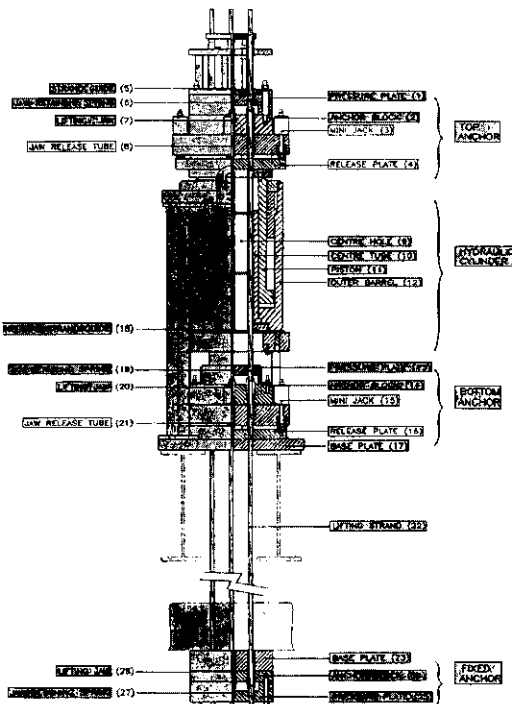


4. 시공과정

4.1 시공관련 도면



LIFTING JACK DETAIL



* LIFTING JACK 재원

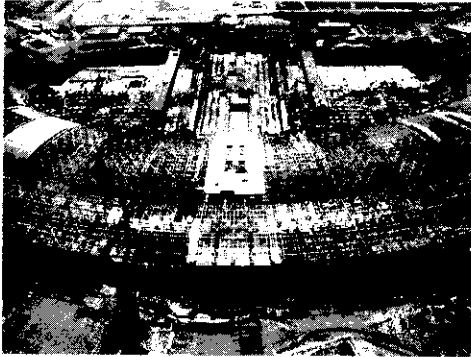
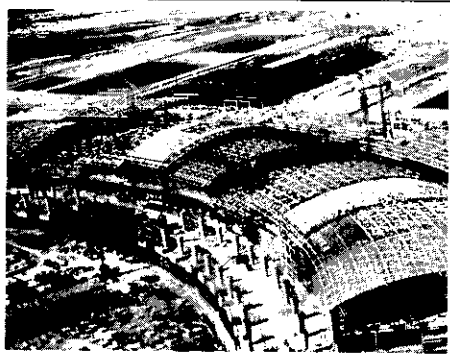
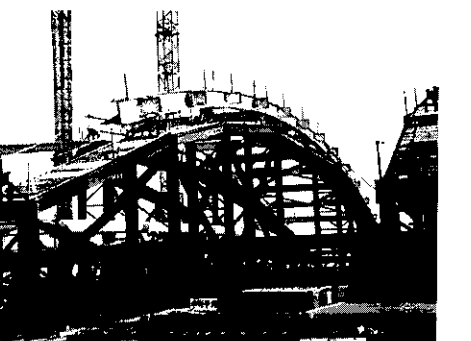
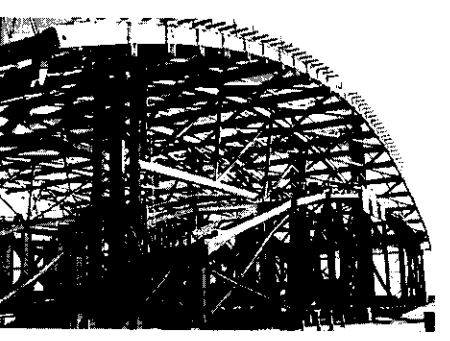
① L180T

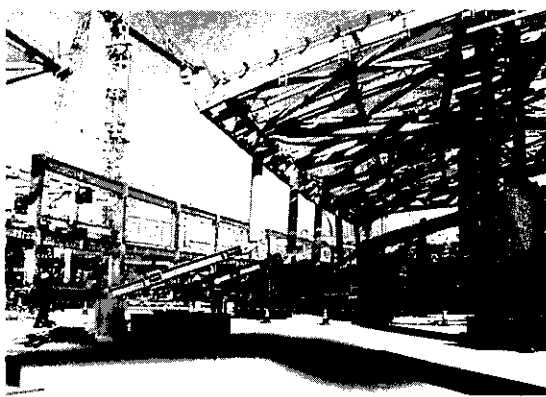
- (a) 스트로크 : 500mm
- (b) 18mm Strand : 38Ton × 12ea
- (c) Cable 항복 하중 : 456 Ton
- (d) Cable 최대 작업 용량 : 180 Ton
(항복 하중의 약 40%)
- (e) 리프팅 속도 : 6m/hr
- (f) 조립된 자체 하중 : 1020 kg

② L300T

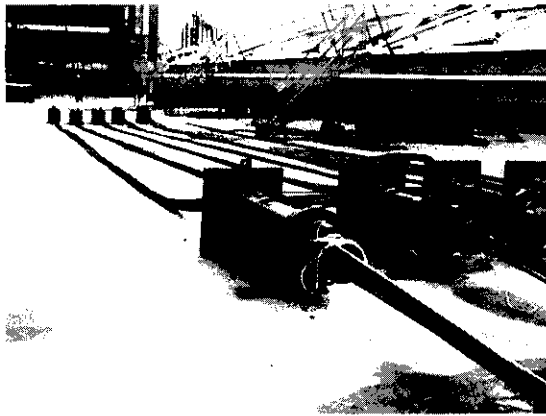
- (a) 스트로크 : 450mm
- (b) 18mm Strand : 38Ton × 19ea
- (c) Cable 항복 하중 : 722 Ton
- (d) Cable 최대 작업 용량 : 300 Ton
(항복 하중의 약 40%)
- (e) 리프팅 속도 : 3m/hr
- (f) 조립된 자체 하중 : 1020 kg

4.2 공정사진

	
'99년 02월 S24,32,48 LIFTING 완료 S40 LIFTING 중 S28,44 조립완료, LIFTING 준비	
	
'99년 03월 TERMINAL ROOF TRUSS LIFT-UP 완료	
	
가설물 조립 ⇒ TRUSS 조립 ⇒ ROOF TRUSS LIFTING	

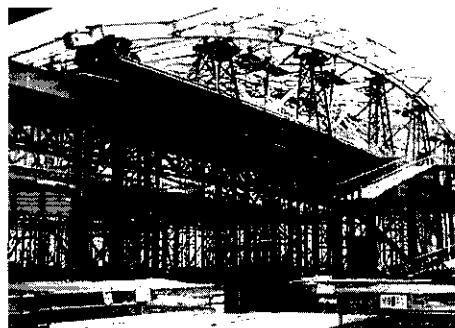
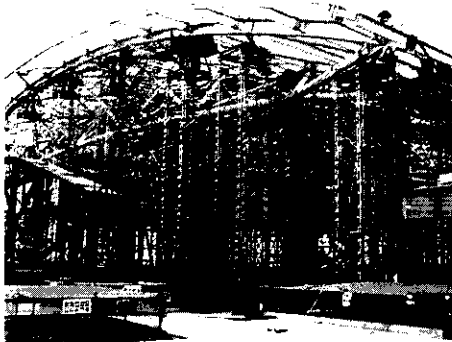


PIN 접합 COLUMN LIFTING



LIFTING JACK & CABLE & ANCHOR

LIFTING TOWER



재래식 비계설치공법

5. 공법 적용 결과

콘소시엄 내의 다른 시공사에 비해 많은 물량을 단기간 내에 소화해 내야하는 당 현장의 여건상 LIFT-UP 공법은 기존의 공법에 비해 공기를 크게 앞당길 수 있으며 품질과 안전의 혁신에 큰 기여를 했다. 앞으로 많은 시공경험과 연구를 통해 더욱 효과적인 공법으로 개선될 수 있는 여지가 많은 공법이다.

5.1 공기단축

분류	A 구역(당사)	B 구역	C 구역
시공방법	LIFT-UP 공법	재래식 비계설치공법	재래식 비계설치공법
착수일	98 년 10 월 12 일	98 년 8 월 17 일	98 년 8 월 15 일
종료일	99 년 4 월 20 일	99 년 2 월 5 일	99 년 3 월 13 일
총작업일	190 일	172 일	210 일
작업중량	6,358 TON	2,505 TON	2,505 TON
일일작업량	33.5 ton/日	14.6 ton/日	11.9 ton/日

5.2 작업자의 안전확보

기존의 공법으로는 고소작업을 해야만 하는 많은 부분들을 거의 지상에서 해결하므로 위험부담이 따르게 되는 고소 작업량이 줄어들게 되어 작업자의 안전을 확보할 수 있었고, 그로인해 당 현장은 무재해 100 만 시간 달성을 1998 년 12 월 30 일에 이루었고 무재해 200 만 시간 달성은 1999 년 5 월 13 일에 이루게 되었다.

5.3 품질개선

지상에서 조립 및 검측이 행해지므로 설치 및 용접에대한 시공이 용이하고, 검측이 용이하므로 ROOF TRUSS 의 품질을 향상시킬 수 있었다.

암반관련 용어해설

1. RQD(Rock Quality Designation)

암반층에서 NX(직경 75mm)크기 이상의 코어(core)의 채취율로서 (식 1.1)과 같이 암반 내 불연속면의 상태를 나타내고 있으며 암반의 양호도를 표시하는 기준으로 삼고 있다.

$$RQD(\%) = \frac{10cm \text{ 이상인 회수암석 길이의 총합}}{\text{굴진전장}} \times 100 \quad (\text{식 1.1})$$

[표 1-1] RQD와 암질관계

R Q D (%)	암 질
0~25	상 당 히 나 뻘
25~50	나 뻘
50~75	보 통
75~90	중 음
90~100	매 우 중 음

RMR 분류, Q 분류, 지지력 추정, 변형계수와 탄성계수 추정 등에 쓰이는 RQD는 다음과 같은 사항에 있어서 유의해야 한다.

- 1) 시추조사중에 깨진 것은 RQD 계산에 포함시킴
- 2) RQD가 높다고 무조건 암질이 양호하다고 판단하는 것은 이암 등과 같은 경우 타당하지 못함
- 3) RQD 측정을 위해서는 NX 규격 시추 및 Double 코어바렐 사용이 필수적임

2. Q-분류법(Q-system)

스칸디나비아에 있는 약 200개의 터널을 조사해서 개발된 정량적인 암반분류 방법으로서 다음 6가지 사항을 고려하여 항목별로 점수를 주어 전체 암반의 상태

를 분류하는 방법이다.

1. 암석의 RQD
2. 절리 set 수(Jn)
3. 절리면의 roughness(Jr)
4. 절리면의 풍화정도(Ja)
5. 지하수 상태(Jw)
6. Stress Reduction Factor(SRF)

$$Q \text{ (Rock Mass Quality)} = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \quad (\text{식 2.1})$$

(식 2.1)에서 첫 번째 항은 암반을 형성하는 블록의 크기, 두 번째 항은 절리의 전단강도, 세 번째 항은 active stress를 나타낸다.

계산된 Q값에 의하여 암반의 보강방법과 보강정도를 결정할 수 있다. 보통 Q 값은 $10^{-3} \sim 10^3$ 범위에 속하며 매우 양호함(exceptionally good)에서 매우 불량함(exceptionally poor)까지 9등급으로 분류되고 이에 따른 보강은 38개 범주로 구분한다. Q값에 의한 지보의 필요성 판단은 터널의 유효크기와 관련하여 판정하고 Q 값이 0.1이하이면 암반이 매우 나쁜 상태이고 400이상이면 매우 좋은 상태를 나타낸다. Q-분류법은 다음과 같은 장·단점을 가지고 있다.

● 장 점

- 1) 암반의 전단강도에 주안점을 둔 분류이고 현장응력을 고려한다.
- 2) 대단면 터널에 적합하고 유동성이나 팽창성 암반과 같은 취약한 층에 적합하다.
- 3) 분류에 따라 구체적이고 체계적인 보강방법이 제시되어 있다.

● 단 점

- 1) 절리의 방향성을 고려하지 않음
- 2) 시추조사자료만으로 신뢰성 있게 판단하기 곤란하다.(자세한 지표지질조사가 있거나 막장관찰자료가 필요함)
- 3) 분류가 복잡하고 지식과 경험이 필요해 숙련도에 따른 오차가 크다

3. RMR(Rock mass rating)

CSIR(South African Council for Scientific and Industrial Research) 암반분류법으로 알려진 RMR은 1973년 Bieniaski에 의해 최초로 소개되었다.

C. 총배점으로 분류한 암반상태

배 점	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20
등급번호	I	II	III	IV	V
상태	매우 양호한 암	양 호 암 반	보 통 암 반	불 량 암 반	매우 불량 암

D. 암반분류 평균치

암 반 등급	I	II	III	IV	V
평균자립 시간	15m 지보에 10년	8m 지보에 6개월	5m 지보에 1주	2.5m 지보에 10시간	1m 지보에 30분
암반의 점착력(kg/cm ²)	> 4000	3000 - 4000	2000 - 3000	1000 - 2000	< 1000
암반의 마찰각	> 45°	35° - 45°	25° - 35°	15° - 25°	< 15°

E. 불연속면의 분류를 위한 지침

불연속면의 길이	<1m 6	1-3m 4	3-10m 2	10-20m 1	>20m 0
불연속면의 간극	없 음 6	<0.1m 5	0.1-1.0mm 4	1-5mm 1	>5mm 0
불연속면의 거칠기	매우거칠 6	거칠 5	약간거칠 3	매끈 1	매우매끈 0
불연속면의 충전물	없 음 6	강한것<5mm 4	강한것>5mm 2	약한것<5mm 2	약한것>5mm 0
불연속면의 풍화정도	신 신 6	약간풍화 5	중간풍화 3	매우풍화 1	완전풍화 0

F. 터널에서 절리면의 주향과 경사의 영향

주향이 터널방향과 수직인 경우				주향이 터널방향과 평행한 경우		Dip 0 °~20 ° 주향이 불규칙
경사방향으로 굴진		경사반대방향으로 굴진				
Dip 45 °~90 °	Dip 20 °~45 °	Dip 45 °~90 °	Dip 45 °~90 °	Dip 45 °~90 °	Dip 20 °~45 °	
매우 견실	견 실	양 호	불 량	매우 불량	양 호	불 량

4. SMR 분류기준

SMR 분류방법은 Romana(1985)에 의해 제안된 암반사면 안정성 평가 방법으로서 대체로 평사투영법에 의한 절리계와 사면의 관계에 의한 파괴형태와 가능성 분석이라는 관점에서 유사하나, 사면 굴착법에 따른 보정과 RMR 값을 기본으로 SMR값을 산출하여 등급을 매기는 사면평가 방법이다.

SMR분류는 기본 RMR 값에서 사면과 절리관계에 의존하는 방향, 경사각에 관

한 조정요소를 공제하고 F_1 , F_2 , F_3 요소를 곱하고 굴착방법에 의한 요소를 더하여 (식 4.1)과 같이 얻는다.

$$SMR = RMR + (F_1 \times F_2 \times F_3) + F_4 \quad (\text{식 4.1})$$

[표 4-2]에서 보는 바와 같이 절리에 대한 조정율은 다음과 같은 3가지 요소로 얻는다.

[표 4-2] 절리에 대한 조정배점

구 분		매 우 양 호	양 호	보 통	불 량	매 우 불 량
P T	$ \alpha_j - \alpha_s $ $ (\alpha_j - \alpha_s) - 180 $	$> 30^\circ$	$30 - 20^\circ$	$20 - 10^\circ$	$10 - 5^\circ$	$< 5^\circ$
P/T	F_1	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
P	$ \beta_j $	$< 20^\circ$	$20 - 30^\circ$	$30 - 35^\circ$	$35 - 45^\circ$	45°
P	F_2	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
T	F_2	1	1	1	1	1
P	$\beta_j - \beta_s$	$> 10^\circ$	$10 - 0^\circ$	0°	$0 - 10^\circ$	$< -10^\circ$
T	$\beta_j + \beta_s$	< 100	$110 - 120$	> 120	-	-
P/T	F_3	0	- 6	- 25	- 50	- 60

P:평면파괴, T:전도파괴, α_j :절리면의 경사방향, α_s :사면의 경사방향, β_j :절리경사, β_s :사면경사

- 1) F_1 은 절리와 사면주향 사이의 차이각(A)으로 얻어진다. 이것의 범위는 1.00(거의 평행한 경우)에서부터 0.15(둘 사이의 각도가 30° 이상일 때 파괴가능성이 매우 낮음) 사이이다.

이들 값은 경험적으로 산정되지만 후에 대략적인 상관관계를 (식 4.2)와 같이 규명하였다.

$$F_1 = (1 - \sin A)^2 \quad (\text{식 4.2})$$

- 2) F_2 는 평면파괴형태에서 절리경사각을 말하며 절리의 전단강도를 추정하는 것이다. 그 값은 1.00(절리면이 45° 이상 경사졌을 때)에서 0.15(절리면이

20° 이하 경사졌을 때)의 범위를 갖는다. F_2 는 경험적으로 정립된 다음 (식 4.3)으로 계산된다. 여기서 β_j 는 절리경사를 나타낸다.

$$F_2 = \tan^2 \beta_j \quad (\text{식 4.3})$$

3) F_3 는 사면과 절리경사각 사이의 관계로서 평면파괴의 경우 F_3 가 사면의 경사와 같은 방향으로 절리가 있는지의 여부를 추정하게 한다. 이 값은 사면과 절리면이 평행할 때에 그 상태가 분명하며 사면경사가 절리경사보다 10° 클 때 사면 붕괴의 가능성이 크다. F_4 는 사면굴착법에 대한 보정으로 경험적으로 정해왔다.

- ① 사면이 장기간 부식되면 식물뿌리, 표면건조 등이 사면을 안정화시키는 작용을 하여 자연사면은 더욱 안정화 된다. ;($F_4 = +15$)
- ② Presplitting은 사면의 안정성을 증가시킨다. ;($F_4 = +10$)
- ③ Smooth blasting을 잘하면 사면의 안정성을 증가시킨다. ;($F_4 = +8$)
- ④ 보통의 발파방법으로는 사면의 안정성을 증가시키지 못한다. ;($F_4 = 0$)
- ⑤ 부적절한 발파(폭발력이 너무 크거나, 발파시간이 적절치 못하거나, 장약공이 평행하지 못한 경우)는 안정성을 감소시킨다. ;($F_4 = -8$)
- ⑥ 리퍼(Ripper)로 사면을 굴착할 수 있는 것은 사면이 매우 연약하거나 선발파한 경우에 가능하고 경사면정리가 어렵다. 이 방법은 사면의 안정성에 영향을 주지 못한다. ;($F_4 = 0$)

5. 터널 해석 프로그램(FLAC, Pentagon, sigma, sap, Mrsoil, UDEC)

일반적으로 터널해석에 널리 사용되는 수치해석기법은 유한요소법과 같은 연속체모델방법, 유한차분법과 같은 불연속체모델방법, 경계요소법과 같은 지반반력 모델로 구분되며 초기응력상태에서 터널을 굴착하여 발생하는 이완하중에 대한 지반의 안정성을 평가하는 기법이다. 입력자료로 단위중량, 전단강도, 탄성계수, 포아송비와 같은 지반물성과 록볼트 단면적, 록볼트 인장강도, 슛크리트 단면 2차 모멘트, 슛크리트 탄성계수와 같은 보강재물성을 함께 넣어준다. 이로부터 수치해석을 통하여 내공변위와 지중변위, 소성영역도, 록볼트 축력, 슛크리트 전단력, 슛크리트 모멘트, 변위수렴도가 출력자료로 나온다.

이와 같이 수치해석을 통한 터널의 해석은 시공단계에 따른 묘사가 가능하나 해석암반이 동방이며 균질하다는 가정하에 해석하므로 암반의 불연속적인 특성을 고려할 수 없다.

이들 여러 수치해석 프로그램은 여러 토질, 암반역학적 해석이 그러하듯 어떠한 프로그램으로 해석하였나 하는 것보다는 얼마나 물성치를 실제와 비슷하게 입력하였느냐는 것이 중요하다.

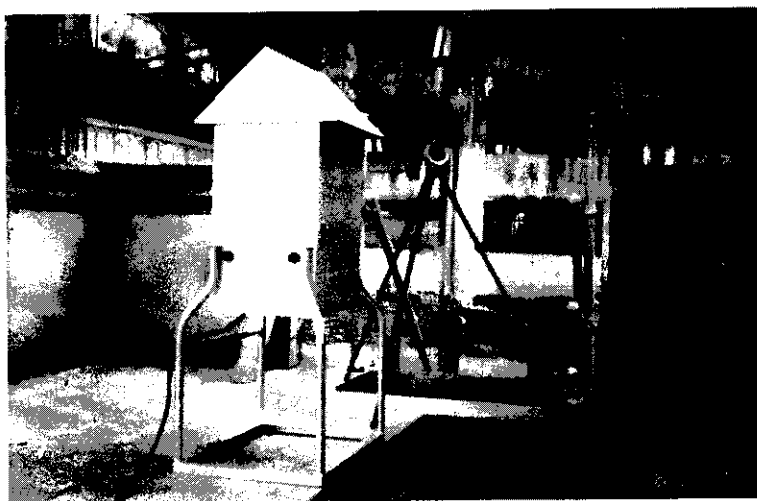
대기측정장비 소개 (현장 비산먼지 측정)

당 기술연구소에서는 현장에서 발생하는 환경오염물질에 의한 환경사고를 최소화시키기 위하여 현장의 환경측정업무의 확대 차원에서 대기중 비산먼지를 측정할 수 있는 High Volume Sampler를 갖추게 되었다.

이 측정장비는 대기중의 TSP(총부유분진), PM10(10 μ m이하의 먼지)을 채취할 수 있으며, 주로 공사장에서 바닥에 쌓인 먼지들이 차량이나 바람에 의하여 비산되는 것을 채취하는 용도로 사용하게 된다.

1999.1.1부로 비산먼지 규제기준이 기존의 1.0mg/Sm³에서 0.5mg/Sm³로 강화되어 특히 맑고 건조한 기상조건에서는 현장에서 먼지 발생에 대한 각별한 주의가 기울이지 않으면 규제기준을 초과하는 경우가 발생할 우려가 높다. 관공서의 지도 점검시에는 비산먼지 발생 방지를 위한 시설이나 조치의 여부를 확인하게 되는데, 토공사 등의 먼지 발생이 많은 공사 수행시 비산먼지를 측정하여 이것을 토대로 하여 현장내의 세륜, 세차 시설을 재점검하고, 공사 차량 통행로의 살수량 등의 조절을 통하여 비산먼지억제대책을 세우게 된다.

이 장비를 갖추게 됨에 따라 기술연구소에서는 발파진동기, 환경진동기, 소음 측정기, 수질측정설비(BOD, COD, SS, pH, 유분, ABS)에 의한 다양한 환경분야의 현장 측정지원을 실시하게 되었다.



소음 · 진동의 피해사례

최근 공사현장에서 자주 발생하는 민원 중 소음·진동에 대한 비중이 증가되고 환경관련법규 등이 강화되어 현장에서의 철저한 관리가 요구되는 실정에 있다. 당 기술연구소에서 현장 기술지원 등을 통하여 수집된 자료와 실례 등을 바탕으로 소음·진동수준에 따른 가축피해 발생양상을 사례별로 정리하였다.

1. 개 요

소음·진동수준에 따른 가축의 피해유발 정도는 지반·지질상태, 입지여건, 평시 생활소음·진동도, 축종, 사양관리 형태, 축군 및 개체별 건강상태, 소음·진동 반복주기, 노출시간, 주·야간, 조·석별, 기상상태, 피해유발 물체의 가시여부 등에 따라 현저한 차이가 있다. 또한 소음과 진동이 동시에 발생되었을 시는 개별요인의 경우보다 피해가 증가되며 야간작업시 강한 조명이나 차량전조등의 영향과 병행될 경우는 피해가 가중되는 것으로 밝혀졌다. 그러므로 어느 한 영역대의 소음·진동도에 대하여 피해수준을 설정한다는 것은 불가능한 일이다.

아울러 인과관계 성립여부와 피해수준을 결정하기 위해서는 실측치 및 다양한 관련요인과 여건을 종합, 검토해야 한다.

2. 건설관련 소음·진동에 의한 피해발생 사례

전술한 바와 같이 소음·진동과 가축피해의 연관정도는 일률적으로 정할 수 없는 성질이다. 물론 여기에는 자연발생적 피해수준과 개체별 질병요인, 사양관리요인, 기타 입지적 여건 등을 조사하여 제외시켰고 건설 소음·진동과 인과관계가 성립된다고 판단되는 부분만 고려한 것이다.

3. 가축피해에 대한 수의학적 검사결과

건설공사가 진행중인 경부고속철도 제○-○공구의 한지역에서 8.5개월간 발생한 가축피해와 이를 수의학적 검사에 의한 원인별 분류결과는 [표 3-1]에 나타난 바와 같다.

또한 건설·소음 실제 가축피해 발생 예를 [표 3-2]에 제시하고 있다.

[표 3-1] 가축피해중 건설공사 요인과의 연관성

축종	총피해두수 (주민신고)	요인별 분류두수				비고
		공사피해	전염병	사양성	기타	
젖소	184	138 (75.2%)	33 (18.0%)	11 (6.0%)	2 (0.8%)	Neosporosis 등
한우	21	6 (28.6%)	9 (43.9%)	3 (14.3%)	3 (14.3%)	바이러스성 설사 등
사슴	33	26 (78.9%)	5 (15.8%)	0 (0.0%)	0 (0.0%)	파스츄렐라증 등
개	56	25 (45.5%)	17 (30.3%)	9 (15.2%)	9 (15.2%)	파보 등
염소	19	5 (25.0%)	9 (50.0%)	5 (25.0%)	5 (25.0%)	살모넬라 등
계	313	200 (63.9%)	73 (23.3%)	19 (6.1%)	19 (6.1%)	

[표 3-2] 건설소음·진동과 가축피해발생 양상

요인	수준 [소음단위: dB(A)]	주요유발 요인	이격 거리 (m)	피 해 양 상	처리결과	비 고
진동 (소음)	0.0889~1.4684 (cm/sec) (55.2~85.2)	터널발파	210	젖소유·사산(16.5%) 폐사 (7.1%) 번식효율저하(17.0%) 유생산성감소(25.2%)	실패해보상 + 이전보상	경부고속철도 재○-○공구
소음	78.0~103.7	토공 (중장비작업)	28	젖소유산 (15.0%) 폐사 (8.0%) 번식효율저하(15.3%) 유생산성감소(22.7%)	실패해보상 + 이전보상	“
소음	72.6~88.0 (81.1)	강관Pile 항타	176	젖소유산 (24.2%) 폐사 (12.5%) 번식효율저하(17.2%) 유생산성감소(9.7%)	실패해보상	경부고속철도 ○○구간
소음	60.0~63.3 (61.4)	강관Pile 항타(차폐구 조물존재)	280	모돈유·사산(11.3%) 폐사 (8.5%) 번식효율저하(10.7%) 성장지연 (9.7%)	실패해보상	“
소음	62.1~66.7 (63.5)	강관Pile 항타(차폐구 조물존재)	130	모돈유·사산(13.1%) 폐사 (9.3%) 번식효율저하(10.3%) 성장지연 (8.0%)	실패해보상	“

요인	수준 [소음단위: dB(A)]	주요유발 요인	이격 거리 (m)	피 해 양 상	처리결과	비 고
소음	71.2~87.9 (80.2)	강관Pile 항타(덤프트 럭후문충격)	119	모든유·사산(16.4%) 폐사 (11.5%) 번식효율저하(26.5%) 성장지연 (10.2%)	실패해보상	“
소음	71.0~90.6 (84.4)	강관Pile 항타	105	모든유·사산(5.9%) 폐사 (13.5%) 번식효율저하(29.4%) 성장지연 (14.0%)	실패해보상	“
소음	52.7~56.9 (53.5)	강관Pile 항타	145	한우성장지연(5.6%)	실패해보상	“
소음	70.5~96.9	강관Pile 항타	72	양계폐사 (7.3%) 성장지연 (19.6%)	실패해보상	“
소음	57.0~80.7 (73.9)	강관Pile 항타	238	도사견유산 (10.4%) 폐사 (11.5%) 성장지연 (7.1%)	실패해보상	경부고속철도 ○○구간
소음	61.1~88.9 (67.9)	강관Pile 항타	270	모든유·사산(6.3%) 폐사 (12.4%) 번식효율저하(3.0%) 성장지연 (7.1%)	실패해보상	경부고속철도 ○○○부근
소음	77.0~97.9 (82.6)	강관Pile 항타	150	모든유·사산(19.8%) 폐사 (4.7%) 번식효율저하(23.3%) 성장지연 (10.1%)	실패해보상	경부고속철도 ○○○부근
소음	94.1~101.0 (96.9)	강관Pile 항타 (차음막설치)	24	산란계폐사 (10.9%) 열란발생 (11.2%) 산란율저하 (19.6%)	실패해보상	“
소음	70.5~86.1	암반제거(Bac k Hoe Breaker)	80	젓소유·사산(27.5%) 도태 (27.5%) 유생산성감소(27.5%) 번식효율저하(27.5%) 성장지연 (14.7%)	실패해보상	서울지방국토 관리청 ○○-○○간 도로공사

요인	수준 [소음단위: dB(A)]	주요 유발요인	이격 거리 (m)	피해양상	처리결과	비고
소음 야간 조명	65.4~93.8 (82.2)	토석채취 (Back hoe breaker) 덤프후문 충격 야간전조등 클랙소음	60	젓소유·사산(27.7%) 도태 (13.4%) 유생산성감소(24.0%) 번식효율저하(15.7%) 성장지연 (11.3%)	실피해보상	○○지역 토석채취공사
소음 진동	68.2~72.3 0.017~0.044 (cm/sec)	터널발파	380	모돈유·사산(25.1%) 자돈폐사 (19.4%) 번식효율저하(20.3%) 성장지연 (14.7%)	실피해보상 + 휴업	경부고속철도 제○-○공구
소음	70.2~76.6 (소음도) 0.291~0.347 mm/sec(진동도)	강관Pile 하차	122	모돈유·사산(39.2%) 모돈도태·폐사 (16.9%)	실피해보상	아산시 ○○○ 개량공사
	70.1~70.9 (소음도) 0.269~0.305 mm/sec(진동도)	강관Pile 하차	135	육성돈폐사·도태 (8.2%) 성장지연 (5.6%)		
	69.8~70.6 (소음도) 0.25~0.29 mm/sec(진동도)	강관Pile 하차	140	포유돈압사 (8.2%) 번식효율저하(18.4%)		

4. 소음·진동과 가축피해와의 상관관계

위의 사례에서 환경소음·진동에 대한 반응도가 여러요인에 따라 상이하므로 특정 소음·진동 수준에서의 가축피해정도를 획일적으로 규정할 수는 없다. 그러나 국내에서는 이에 관한 종합보고사례가 전무하여 해당분야 업무를 관장하는 부서나 시공사 또는 피해를 입고 있는 축산농민들의 참고자료가 될 수 있을까하여 사례와 자료들중 일부를 비교하여 소음·진동도와 가축피해와의 관계를 도식화해 보았다.(표 4-1, 표 4-2)

[표 4-1] 축종별 피해발생율(소음) 기준치

현 황		dB	50~60	60~70	70~80	80~90	비 고
젖소	유 생산성저하		5~10%	10~20%	30% 이상	40% 이상	
	성장지연		0~5%	5~10%	10~20%	30% 이상	
	유·사산			5~10%	10~20%	30% 이상	
	번식효율저하			5~10%	10~20%	30% 이상	
	폐사율 증가			5~10%	5~10%	10~20%	
한우	유·사산			0~5%	5~10%	10~20%	
	번식효율저하			5~10%	10~20%	30% 이상	
	성장지연			5~10%	10~20%	30% 이상	
	폐사율 증가			0~5%	5~10%	10~20%	
돼지	유·사산		0~5%	5~10%	10~20%	30% 이상	
	자돈압사, 폐사		0~5%	5~10%	10~20%	30% 이상	
	산자수 감소		0~5%	5~10%	10~20%	30% 이상	
	번식효율 저하			5~10%	10~20%	30% 이상	
	성장지연			5~10%	10~20%	30% 이상	
	모돈폐사				5~10%	10~20%	
닭	산란율저하		5~10%	5~10%	10~20%	30% 이상	기러기, 꿩 등 야생조류는 닭보다 피해율이 높음
	이상란율 증가			5~10%	10~20%	30% 이상	
	수정란율 저하			5~10%	10~20%	30% 이상	
	폐사율 증가			5~10%	10~20%	30% 이상	
	성장지연			5~10%	10~20%	30% 이상	
개	유·사산			0~5%	5~10%	10~20%	인과요인이 번식계절에 가해질 경우
	자견폐사			0~5%	5~10%	10~20%	
	번식효율저하			0~5%	5~10%	10~20%	
	성장지연			5~10%	10~20%	30% 이상	
	산자수 감소			0~5%	5~10%	10~20%	
사슴	유·사산			0~10%	10~20%	30% 이상	인과요인이 번식계절에 가해질 경우
	수태율 저하			0~5%	5~10%	10~20%	
	성장지연			5~10%	10~20%	30% 이상	
	녹용생산성저하			0~10%	10~20%	30% 이상	
	폐사율 증가			0~5%	5~10%	10~20%	
곰	유·사산			5~10%	10~20%	30% 이상	인과요인이 번식계절에 가해질 경우
	수태율저하			0~5%	5~10%	10~20%	
	성장지연			5~10%	5~10%	30% 이상	
	폐사율 증가				5~10%	10~20%	
염소	산자수 감소				0~5%	5~10%	인과요인이 번식계절에 가해질 경우
	산자율감소			0~5%	5~10%	10~20%	
	수태율저하			0~5%	5~10%	10~20%	
	성장지연			5~10%	5~10%	10~20%	
	폐사율 증가				5~10%	10~20%	

- 1997년 5월 축산기술연구소, “건설공사에 의한 가축피해 및 구제방안”

[표 4-2] 축종별 피해발생율(진동) 기준치

현 황		kine (dB) ¹⁾	0.01~0.02 (51~57) ¹⁾	0.02~0.05 (57~65) ¹⁾	0.05~0.1 (65~71) ¹⁾	0.1~0.5 (71~85) ¹⁾	0.5~1 (85~91) ¹⁾	비 고
젖소	유 생산성저하		5~10%	10~20%	30~40%	30~40%	40% 이상	
	성장지연		0~5%	5~10%	10~20%	10~20%	30~40%	
	유·사산		0~5%	5~10%	10~20%	30~40%	40% 이상	
	번식효율저하		0~5%	5~10%	10~20%	30~40%	40% 이상	
	폐사율 증가			5~10%	5~10%	10~20%	30~40%	
한우	유·사산		0~5%	5~10%	10~20%	30~40%	40% 이상	
	번식효율저하			5~10%	0~5%	10~20%	30~40%	
	성장지연		0~5%	5~10%	10~20%	10~20%	30~40%	
	폐사율 증가			0~5%	0~5%	10~20%	30~40%	
돼지	유·사산		5~10%	10~20%	10~20%	30~40%	40% 이상	
	자돈압사, 폐사		0~5%	5~10%	10~20%	30~40%	40% 이상	
	산자수 감소		0~5%	5~10%	10~20%	30~40%	40% 이상	
	번식효율 저하		5~10%	5~10%	10~20%	10~20%	30~40%	
	성장지연		5~10%	5~10%	10~20%	30~40%	30~40%	
닭	산란율저하		5~10%	10~20%	30~40%	30~40%	40% 이상	
	이상란율 증가		5~10%	5~10%	10~20%	30~40%	40% 이상	
	수정란율 저하		5~10%	5~10%	10~20%	30~40%	40% 이상	
	성장지연		0~5%	5~10%	10~20%	10~20%	30~40%	
개	유·사산		0~5%	5~10%	10~20%	10~20%	30~40%	인과요인이 번식계절에 가해질 경우
	자견폐사		0~5%	5~10%	5~10%	30~40%	40% 이상	
	번식효율저하		0~5%	5~10%	5~10%	10~20%	30~40%	
	성장지연		5~10%	5~10%	5~10%	10~20%	30~40%	
	산자수 감소			0~5%	5~10%	10~20%	30~40%	
사슴	유·사산		0~5%	5~10%	5~10%	10~20%	30~40%	인과요인이 번식계절에 가해질 경우
	수태율 저하		0~5%	5~10%	5~10%	10~20%	30~40%	
	성장지연		0~5%	5~10%	5~10%	10~20%	30~40%	
	녹용생산성저하		5~10%	10~20%	30~40%	30~40%	40% 이상	
	폐사율증가		0~5%	10~20%	10~20%	30~40%	40% 이상	
곰	유·사산		0~5%	5~10%	10~20%	10~20%	30~40%	인과요인이 번식계절에 가해질 경우
	수태율저하		0~5%	5~10%	5~10%	10~20%	30~40%	
	성장지연		0~5%	5~10%	5~10%	10~20%	30~40%	
	폐사율 증가		0~5%	5~10%	5~10%	10~20%	30~40%	
	산자수 감소			5~10%	5~10%	10~20%	30~40%	
염소	산자율감소			5~10%	5~10%	10~20%	30~40%	인과요인이 번식계절에 가해질 경우
	수태율저하			5~10%	5~10%	10~20%	10~20%	
	성장지연			5~10%	10~20%	10~20%	10~20%	
	유·사산				0~5%	5~10%	10~20%	
	폐사율 증가			5~10%	10~20%	10~20%	30~40%	

- 1997년 5월 축산기술연구소, “건설공사에 의한 가축피해 및 구제방안”

¹⁾은 진동속도를 dB로 환산한 것임(단순조화진동이라 가정할 때 호환가능)

5. 피해금액의 산정

가축의 피해금액 산정은 축종별, 피해내역별 고려요인을 분석하고 공기 및 피해 발생시점으로부터 보상시기까지 경영손실을 감안해야 하며, 이와 같은 피해산정식의 하나를 제시하면 [표 5-1]과 같다.

[표 5-1] 가축피해금액 산정식의 예

현황		예상 피해액 산정식
젖소	유량감소	평균우대(기납유실적 평균치)×생산성 저하분×공기/12
	성장지연	분유폐기 육성우가격×육성우두수×성장지연율×공기/12
	유·사산	초유폐기 송아지가격×성우두수×유,사산발생율×공기/12
	모체도태	(초산우가격-노산우가격)×성우두수×유,사산발생율×공기/12
	폐사	분유폐기 육성우가격×육성우두수×폐사율×공기/12
한우	유·사산	젖떼기가격×성우두수×유,사산 발생율×공기/12
	번식효율	젖떼기가격×성우두수×번식효율저하율×공기/12
	성장지연	중소가격×육성우두수×성장지연율×공기/12
	폐사율증가	중소가격×사육두수×폐사율×공기/12
돼지	유·사산	모돈수×10두(평균산자수)×유,사산율×자돈가×공기/12
	자돈압사,폐사	모돈수×10두×산자수 감소율×자돈가×공기/12
	산자수감소	모돈수×10두×산자수 감소율×자돈가×공기/12
	번식효율저하	모돈수×10두×번식효율 감소율×자돈가×공기/12
	성장지연	모돈수×10두×성장지연율×규격돈가×공기/12
	모돈폐사	모돈수×폐사율×모돈가×공기/12
닭	산란율저하	정상산란수×산란저하율×(종)난가×공기/12
	이상란율증가	정상산란수×이상란율 증가율×(종)난가×공기/12
	수정란율증가	정상산란수×수정율저하×종란가×공기/12
	폐사율증가	사육두수×폐사율×중추가(종계, 육계)×공기/12
	성장지연	사육두수×성장지연율×중추가(종계, 육계)×공기/12

[표 5-2] 축종별 권고기준(안)

가축종류	권고기준		암소음dB(A)		암진동dB(V)	
	소음dB(A)	진동dB(V)	L _{eq}	L _{max}	L ₁₀	L _{max}
소	70이하	70이하	69	77	30	52
돼지	70이하	70이하	75	86	27	68
닭	70이하	70이하	70	78	67	74
사슴	70이하	-	69	85	29	83

1. 낮동안의 기준임. 야간에는 건설진동 발생을 원칙적으로 배제함
 2. 암소음, 암진동이 대단히 낮은 경우에는 세심한 관찰이 요구됨.
- * 1996. 12. 환경부, 환경분쟁조정위원회, 연구기관-한국자원연구소