韓國海洋工學會誌 第12卷 第1號, pp.3~9, 1998. 2

◉ 技術報告

쉴드 공법의 시공성 개선에 관한 연구

김 민 성* · 한 건 모**

(97년 5월 28일 접수)

Study on the Betterment of Construction Capacity in SHIELD Method

Min-Sung Kim* · Kun-Mo Han**

Key Words : Excavation Work(굴착 작업), Traffic Obstacle(교통장애), Congestion(정체), Electric Wires(전력구), Shield Method(가력막이공법), Rockburst(산창)

Abstract

According to the development of cities, electric wires and communication lines which are currently above the ground effect on the bad.

Nowadays, it is necessary to build up underground facilities because the construction is increasing. Excavation work has been dominant even though the inconvenient things occurred, for example a civil appeal, a traffic obstacle, safety and spoiling the fine view because of the cost or period of the construction work.

But the congestion of cities are more and more serious. Therefore shield-method is the way to escape from congestion. I considered all the construction fields which are in progress or finished.

Ⅰ. 서 론

영국의 템즈강을 횡단하는 도로 터널을 축조하기 위하여 1925년 고안한 이후로 1931년 모스크바의 지하철 공사에 쉴드공법을 도입하여 고능률화를 시도하였다.

Mechanical Shield나 콘크리트 세그먼트의 개발과 Erector 세그먼트를 조립하는 전용장비도 개발하여 소련이 현대 쉴드공법의 기초를 닦았다. 현재 보편적으로 사용하고 있는 일본은 1942년 시모노세끼 터널 (연장 : 725.8m, 단면크기 : 7m)을 시작으로 해저터널과 지하철, 상하수도 공사를 중심으로 공사량이 급격히 불어나기 시작했다. 압축공기를 병용하던 쉴드공법도 일본 특유의 초연약지반에 지하수가 풍부한 상황으로 인해 약액주입공법 등을 보조공법으로 하여 지반을 다지기 할 필요가 많았다.

열악한 작업환경이나 주변지반에 대한 영향으로

* 남광토건주식회사
** 종신회원, 동아대학교 해양공학과 교수

1965년부터 일본은 독자적으로 밀폐형 쉴드를 개발하여 1967년에는 이수식 쉴드공법 그리고 1974년에는 상수도 터널에 토압식 쉴드를 개발하여 적용하기에 이르렀다. 이런 쉴드는 굴착부가 밀폐되므로 이수나 굴착 토사의 압력을 이용하여 굴착면의 토압이나 수압을 기계적으로 안정시키는 장점이 있다. 약액주입법 공법은 지하수의 오염이 사회적으로 문제가 되어 1974년에는 이의 사용을 제한하게 되었다. 그러나 원칙적으로 굴착면 안정을 위한 보조 공법이 필요하므로 밀폐형 쉴드는 1976년경부터는 비약적으로 수요가 늘어나 1980년대 후반에는 전체 쉴드공법의 80%를 점하게 되었으며 오늘날에는 특수한 경우를 제외하고는 쉴드라고 하면 밀폐형 쉴드를 일컫게 되었다. 1987년까지 쉴드공법에 의한 터널연장이 3,500Km에 이른 일본은 전세계 쉴드공법에 의한 공사량 중 약 90% 정도를 행하고 있다.

오늘날 쉴드공법 또한 일반에 알려진 대로 연약지반에 국한되어 적용되는 공법이 아니며 대도시 지하 구조물을 건설하는데 수반되는 비용은 지금까지와는 달리 직접 공사비 외에 민원, 교통장애, 안전등의 요소가 더욱 심하게 대두되고 있으며, 각종 지하 매설물과 지하철 등을 피해 대형 지하 구조물을 구축하기 위해서는 심도가 깊은 지하를 이용할 수밖에 없는 상황에 이르렀다[1]. 지상에 최소한의 지장을 주는 방법으로 쉴드공법의 쓰임새가 높아질 것으로 사료되어 현재 시공되어지고 있는 과정에서 발생되는 문제점 및 범할 수 있는 오류를 극소화하고 나름의 대안을 모색해 보고자 함을 본 연구의 목적으로 하였다.

Ⅱ. 기본 이론과 쉴드 선정기준

복공은 터널의 완성은 물론 시공도중에도 안전성과 기능성이 충만되도록 설치되지 않으면 안된다. 이 과정에서 설계상 고려하여야 할 하중은 주하중인 연직 및 수평토압, 수압, 자중, 상재하중의 영향, 지반 반력과 종하중인 내부하중, 시공시 하중, 지진의 영향 그리고 특수하중인 병설터널의 영향, 지반 침하의 영향을 배려 하여야 한다.

2-1. 토압, 수압의 고려방법

토압의 산정에 있어서의 물의 취급은 막장의 조건에 따라서 흙과 물을 분리하여 취급하는 토,수압 분리 방법과 물을 흙의 일부로 포함하는 수,토압 일체 방법이 있다.

일반적으로 분리방법은 지하수위의 변동에 대하여 간격수위를 측정하기 힘든 사질토에 적용하고 일체 방법은 점성토에 채용되고 있다.

사질토와 점성토의 구분은 토질조사에 있어서의 흙의 물리시험 및 역학시험에 의하여 얻어진 데이터에 따라서 판단되는 것이 일반적이지만 명확한 구분을 할 수 없을 때에는 토,수압 분리와 토,수압 일체의 양자에 대하여 검토하여 안전한 방법을 채용치 않으면 안된다. 호층 지반에 있어서는 각 토층을 단일토층 지반과 같은 양의 사고하에서 분류하고 평가하는 것이 일반적이다. 그러나 터널위치 부근이 호층으로 되어 있을 때에는 호층지반으로 취급하는 것보다 터널 위치부근의 토층을 단일 토층으로 취급하는 것이 합리적 일때도 있다. 이런 때에는 계산된 연직 토압 및 지반반력의 상호관계를 상세히 검토하는 것이 필요하다. 수압에 대하여서는 토,수압의 분리의 경우에는 정수압을 기준으로 연직방향에 등분포하중, 수평토압에 등변분포하중을 설정한다. 토,수압 일체의 경우에는 물을 포함한 흙으로 취급하게 됨으로 수압을 설정할 필요는 없다. 수압은 터널의 시공중 및 장래의 지하수위의 변동을 예상하고 안전한 설계가 되도록 설정할 필요가 있다. 일반적으로 지하수위가 낮게되면 세그먼트 주단면에 발생하는 응력도가 크게될 경향이 있으므로 주의를 하여야 한다.

연직토압과 연직 지반 반력은 복공의 정부에 작용하는 등분포하중으로 취급하고 그 크기는 터널의 토피층, 외경 및 지반의 조건등에 따라 정해지는 것이고 전 토피층의 토압을 채용하는 경우와 완토압을 채용하는 경우가 있다.

경질의 점성토의 완토압은 Table 1. 에 표시하는 Terzaghi의 하중토를 참고하여 설정하는 경우도 있다[2].

또한 성토나 일단 굴착한 흙을 재차 메우는 흙등의 Arch Ring효과가 기대할 수 없는 지반에 대하

Table 1. Distribution of soil load on the supporting members by Terzaghi

암반의 상태	토하층의 높이	적 용
① 견경질로서 침해되지 않는 것	0	단락이나 rockburst(산창)가 있을 경우에는 경이한 보공이 필요.
② 경질로서 층상 또는 상의 모양	0-0.5B	경이한 지보공사용 하중은 장소마다 불규칙 변화
③ 대괴상으로서 보통정도의 절리가 있는 모양	0-0.25B	경이한 지보공사용 하중은 장소마다 불규칙 변화
④ 보통정도로 괴상으로서 갈라진 틈이 있는 것	0.25B	측압 없음
⑤ 심한 소괴로서 갈라진 틈이 많은 것	(0.35-1.10)*(B-H_L)	측압은 작거나 없음
⑥ 완전히 파쇄되어있으나 적으로 침해되지 않는 것	1.10(B-H')	측압 누수에 의하여 여러곳의 하부가 연약시에는 지보공하부에 걸쳐서 토대를 하거나 원형 지보공을 할 필요가 있다.
⑦ 서서히 밀려서 나오는 것 (중정도의 피층)	(1.10-2.10)*(B-H_L)	큰 측압 인파스트랏이 필요하고 원형 지보공이 주장됨
⑧ 서서히 밀려서 나오는 것 (큰 피층)	(2.10-4.50)*(B-H_L)	큰 측압 인파스트랏이 필요하고 원형 지보공이 주장됨
⑨ 팽창성의 지질	(B+H_L)의 80이상	원형 지보공이 요함.팽창성이 심할 때는 가 축지보공을 사용

주: 1. 이 표는 토피층이 1.5 (B+H_L) 이상일 때의 강제지보공 상단에 작용하는 토하층의 높이를 표시한다.
B는 터널 굴삭단면의 폭(m)
H_L는 터널 굴삭단면의 높이(m)

여는 기 지반의 성장 및 규모등을 감안하여 연직하중을 안전치에 설정할 필요가 있다.

Table 2. Side soil-pressure factor and horizontal direction subgrade reaction factor k

흙의 종류	λ	k(kgf/cm)	N치에 관한 표준
아주 탄탄한 사질토	0.35 - 0.45	3.0 - 5.0	N ≥ 30
단결된 점성토			N ≒ 25
탄탄한 사질토	0.45 - 0.55	1.0 - 3.0	15 ≤ N-30
경질의 점성토			8 ≤ N <25
중정도의 점성토		0.5 - 1.0	4 ≤ N <8
연한 사질토	0.50 - 0.60	0 - 1.0	N < 15
연한 점성토	0.55 - 0.65	0- 0.5	2 ≤ N < 4
아주 연한 점성토	0.65 - 0.75	0	N < 2

수평토압은 복공의 양측부에 기 횡단면의 도심의 직경에 설치한 수평방향으로 작용하는 등변 분포하중으로 하고 그 크기는 연직방향의 토압에 측방 토압 계수를 곱하여서 산출하는 것이다. 측방토압 계수를 정확하게 결정하기 어려우나 일반적으로 수평방향 지반반력 계수 k와의 관련에 있어서 Table 2. 에 표시하는 범위내에서 설정하고 있다. 호층지반에 있어서의 측방토압 계수 및 수평방향지반 반력계수는 각 토층의 성상 및 층의 두께와 터널 위치의 관계를 고려하여 판단할 필요가 있으나 통상은 터널 측방을 구성하는 지반의 지배적 토층을 근거로 하여 안전하게 설정하는 방법을 쓰고 있다[3].

또한 수평지반반력은 관용계산법과 수정관용계산법으로서 대표되는 삼각형 분포를 가정하는 방법외에 연직하중의 균형을 생각한 것과 같은 지반들림에 의하여 터널이 지지되는 것으로서, 이 영향을 가미하는 방법도 있다. 이 경우 지반반력은 연직방향과 수평방향의 양쪽모두가 동시에 고려되는 것이다. 또한 수압이 비교적 적을 때에는 연직토압

에 비하여 수평토압을 작게 잡으면 단변력이 현저하게 증가하는 것으로 되기 때문에 주의할 필요가 있다. 측방토압계수 및 수평방향 지압반력 계수의 설정에 있어서는 지반조건 및 하중조건을 충분히 고려함과 동시에 유사 시공 예 등을 참고로 하여 신중히 검토하여야할 필요가 있다.

2-2 세그먼트의 응력계산

Bolt연결부위 형성되는 세그먼트 Ring은 세그먼트 단체와 같은 굴곡강성을 가진 강성 일반적인 Ring에 의하여 변화하기 쉽다. 이것은 세그먼트의 연결부위의 강성의 강도와 같이 세그먼트 단체의 그것보다 작은 것에 기인하고 있다. 이 때문에 세그먼트의 조립에 있어서는 갈지자형으로 조립키로 하고 인접 세그먼트의 첨점효과에 의하여 강성과 강도의 부족을 보충하고 있는 실정이다. 저항토압은 세그먼트 Ring의 변형에 따라서 수동적으로 발생하는 하중이며, 세그먼트의 설계에 특유한 것이지만 기 사고방식이 Ring의 거동에 주는 영향은 크다. 이러한 사정에서 세그먼트 Ring의 변형생성을 어떻게 평가하여 기 구조모델과 저항토압들의 설정여부는 세그먼트 Ring의 설계계산법을 지배하는 중요한 문제다. 표준 세그먼트의 설계에 있어서는 세그먼트 Ring을 굴절강성 일반적인 Ring에 위치케함과 동시에 저항 토압으로서 삼각형분포를 하는 수평토압을 쓰고 있다. 이 방법은 Bolt 연결부위의 영향을 Ring 전체의 일반적인 굴곡강성 저하라고 평가하고 있는 것으로 세그먼트 단체의 굴곡강성 EI에 굴곡강성의 유효율 n을 곱한 nEI의 강성, 일반 Ring이 구조모델이다. 또 세그먼트의 설계용 굴곡 moment로서는 굴곡강성 nEI의 Ring에서 계산된 설계대상의 굴곡모멘트 m을 활증률 (cos C≤1)만 크면 활증하여 n(1+C)를 설계용 굴곡모멘트로서 갈지자형 조립에 의한 연결부위의 영향을 고려하고 있다. 이 설계법은 연결부위의 Hinge성을 굴곡강성의 유효율 n과 굴곡모멘트의 활증률에 대하여 평가하는 것이지만 n과 z는 축력 등 단면력의 크기에 따라서 변화되기 때문에 정성적인 이해에 그치고 있는 것이 실정이다. 표준 세그먼트의 설계는 n=1, z=0의 짜맞춤에 대하여 시산하고, 양자의 차이가 적은 것을 확인하고 있다. 또한 n=1, z=0은 연결부위가 강성 연결부위임을 의미한다. 공업회 규정 세그먼트의 표준 세그먼트에 준하여 설계한다. 따라서 설계하중의 설정부터 구조모델로서 강성 일반적인 Ring을 사용하여 n=1, z=0으로서 설계하는 것까지 총체가 표준 세그먼트와 같은 것이다[4].

표준 세그먼트의 설계와 같이 일반적인 Ring을 구조모델로 하는 경우에는 세그먼트 Ring의 변형은 꺾음으로서 생기는 것이니까, 지반조건에 따라서는 연결부위에 Hinge성을 설정하여, 변형에 대처하는 것이 유리하게 될 수도 있다. 예시하면 막장(地山)이 양호하여 세그먼트 Ring의 변형이 막장에 대하여 구애되어, 허용 변형내에 수용할 수 있을 때에는 연결부위에 Hinge성을 허용함으로써 굴곡moment의 발생을 억제할 수가 있다. 그러나 강성 일반적인 Ring의 역학에 의하는 한, 이러한 경우에 대하여 적절히 대처하기가 곤란하다. 세그먼트 Ring의 구조모델로서 탄성 Hinge가 있는 Ring을 구조모델로 한 경우의 n과 z를 연결부위의 상태에 관련하여 설명할 수도 있다. 이러한 경우에는 지반조건에 대하여는 탄성 Hinge를 갖는 Ring을 구조모델로서 설계 계산하여 세그먼트의 설계를 합리화할 필요가 있다[5].

Ⅲ 실험 방법

3-1 실험 방법 소개

세그먼트부착 수팽창 지수재의 수팽창 시험에서도 세그먼트 이음부간의 방수 방법에는 씨일공, 씨일공 + 코킹공, 이음줄눈 주입공 형태가 있는데, 이 중 세그먼트 사면에 홈을 만들어 이곳에 지수재를 부착하여 상호 팽창 작용에 의한 지수 효과를 발휘하는 방수작용제를 가리켜 수팽창 지수재(Seal)라고 한다.

쉴드 터널 공사는 세그먼트 조각들이 고장력 볼트로서 세그먼트간을 결속시켜 구조물이 완성되고 세그먼트간의 수팽창 지수재가 지중의 수분과 접촉하여 팽창함으로써 간극을 차단, 밀폐를 시켜 방수 효과를 전담함으로써 시공 중 또는 공사 완공

후 가장 큰 하자 발생 요인이 될 수 있다[6].

수팽창률 시험 방법은 초기의 두께가 동일한 3종을 4㎝ 길이로 절단하여 상온의 각기 다른 조건의 물에 수침한 후 2달간을 10일 간격으로 수팽창률을 측정하고 그 이후는 15일과 1달 간격으로 측정하여 그 결과를 정리하였다.

계측기의 설치 위치는 현재 국내에서 쉴드공법이 시행되는 곳은 연약 지반의 지하 구조물 건설에 많이 이용이 되고 있음으로 연약 지반 위에 세워진 타 구조물에 미치는 영향을 알아보는 것은 시공의 안전성에 의의가 있다 하겠다.

본 논문에서는 쉴드 통과 구조에서 지중침하계, 수위계, 지중경사계로 구성된 계측 장비를 매설하여 쉴드기가 통과전 20m 지점과 통과후 20m 지점의 지중 변위 상태를 계측하여 보았다[7].

수위계, 지중사계, 지중층별 침하계는 설계심도에서 2m정도 더 천공하여 설치하고 구조물 기울기는 쉴드기 통과 인근의 피어구조물에 설치하였다.

3-2 결과 및 고찰

분석결과 수팽창 지수재는 시방서상 언급된 품질 규정(인장강도, 경도, 팽창율)으로는 제품의 충분한 검사가 미비함으로써, 보강된 품질 규정(단기 열노화 시험, 장기 열노화 시험, 압축·개방반복, 틈새에 따른 지수성 시험, 습윤·건조 반복 후의 지수성 시험, 장기 지수성 시험, 염수중의 팽창성 시험, 내약품성 시험) 등이 품질 규격으로 제정되어 쉴드 상황에 맞는 제품 선정이 되도록 해야 될 것 같다.

지수재와 지수재 간의 팽창률이 증가할수록 작용 수압에 대한 지수 효과는 향상되지만 필요 이상의 과팽창은 지수재의 탈락이나 구조물 사이로 빠져나오는 현상이 기 완공된 현장에서 나타나고 있다.

Table 3, 4, 5에서와 같이 수도물, 현장수, 약품+현장수의 수팽창률이 서로 다르게 나타나고 있으며 온도에 따른 편차를 나타내고 있다. 이로 인하여 선진국인 일본의 예와 국내 타 현장의 예를 참고한 결과 팽창률이 3배 이상의 제품은 정체 수중의 경우이고, 통상적인 작업환경에서 접하게 되는 현장 수에는 팽창률이 현저하게 줄어듦을 확인하였고, 이로 인하여 최근 일본의 현장에서는 수팽창률이 높은 제품은 장기간 수침이될 경우나 팽창과

Table 3. Expansion rate by tap water (%)

	04-13	04-24	05-04	05-15	05-31	06-15	06-30	07-15	08-15	09-15	10-15	11-15	12-15	01-15
A	1,020	1,020	1,144	1,064	1,120	1,120	1,115	1,115	1,117	1,117	1,013	1,010	993	998
B	400	642	444	440	442	440	443	443	443	443	440	435	434	434
C	875	1,279	850	880	854	855	857	855	858	858	812	802	796	796

Table 4. Expansion rate by the field water (%)

	04-13	04-24	05-04	05-15	05-31	06-15	06-30	07-15	08-15	09-15	10-15	11-15	12-15	01-15
A	225	196	2741	294	282	284	286	288	289	289	281	273	270	270
B	325	431	410	412	403	401	401	403	403	403	400	400	399	399
C	483	656	503	562	501	505	507	505	501	501	497	490	479	479

Table 5. Expansion rate by the field water and chemicals (%)

	04-13	04-24	05-04	05-15	05-31	06-15	06-30	07-15	08-15	09-15	10-15	11-15	12-15	01-15
A	229	384	420	297	402	403	406	403	405	405	401	399	398	387
B	305	375	40	403	399	401	401	399	400	400	400	398	397	397
C	442	560	569	548	548	544	544	542	545	545	531	526	521	521

수축이 반복될 경우 팽창을 일으키는 물질의 자연 감소로 인한 내구성에 의문성이 제기되고 있는 관계로 최대 팽창률의 3배의 것이 보편화되어 있다[8].

Table 6에서 나타내는 것과 같이 수침한 후 팽창된 제품을 건조하여 질량을 확인하여 보면 감소비율이 제품에 따라 큰 것을 확인할 수 있다[9].

Table 6. Mass change rate (%)

	9	15	35	67	80	130	180	307	305
A	231.7	230	145.2	109.4	108.7	102.1	99.9	100	94.2
B	218.7	230.1	230.4	240.2	238.7	245.4	241.5	249.9	233
C	70.3	200	392.3	273.6	291.2	129.8	99.8	96.5	89.7

쉴드공사의 발주 기관에서는 지하 구조물의 설치 중 접하게 되는 지하수의 성분이 다르므로 수팽창 지수재의 내구성이나 내약품성에 대한 관찰 및 기록에 대한 유지가 요구된다[10~11].

Ⅳ. 결 론

대도시의 공간활용이 확대됨에 따라서 지하 및 해양공간 이용에 대한 연구가 활발해지고 있다. 지하 구조물의 설치를 위한 시공의 한 대안으로서 쉴드공법의 쓰임은 단순한 전력구, 통신구 등에서 지하철 및 지하 생활공간과 해저터널의 건설에 활용의 빈도가 높아지고 있는 추세이나 국내의 여건은 이것을 뒷받침하지 못하는 실정이다.

우리나라 산업구조의 고부가가치화에도 건설업이 부응하며 쉴드공법을 이용한 지하굴착이 활발하게 적용되고 있으며 실제 해저터널과 전력구 및 통신구 건설과정에서 분석연구를 통하여 다음과 같은 결과를 얻을수 있었다.

1. 쉴드공사의 주축을 이루는 것이라 할 수 있는 세그먼트의 설계가 국내의 토질과 여건에 맞는 것으로 개선되어야겠다.
2. 국내에서 시행되고 있는 쉴드공사의 쉴드기 본체 및 후방설비가 모두 수입 및 조립단계에 머물고 있어 국내 수요가 적더라도 기술 이전 및 개발이 시급하다.
3. 계측의 결과에서도 보았듯이 침하 등의 지반여건 변화를 좀더 커버할 수 있는 Back Fill의 방법 및 2차 오염이 없는 약재가 개발되어야겠다.
4. 기완공된 쉴드 터널이 방수부분의 하자시 보수방법의 개발 및 사용되고 있는 수팽창 지수재의 내구성 및 변화사항이 장기적이고 저속적으로 연구되어야 한다.
5. 연약지반인 점성토 지질이나 매립이 되었던 지역에 Shield공사가 주로 시행되지만 이때 배출되는 배출토가 일반적으로 N치 3~4이하의 검은색의 흙이 배출 된다. 일반인의 인식부족으로 사토의 상당한 어려움이 있는바 배출토에 대한 정확한 분석으로 필요한 곳에 재활용되거나 안정적 처리가 될 수 있는 방법이 모색되어야만 Shield공법의 국내적용이 한층 더 용이해 질 것 같다.

앞에서도 거론한 바와 같이 한국의 지질여건에 맞는 세그먼트, 후방설비, shield기의 개발은 필수적이라 할수 있으며 Shield공법의 사용 확대에 따른 주변 여건의 변화 및 영향 등에 대한 지속적인 연구가 요구된다.

Ⅴ. 참고 문헌

1) "건설계측관리", 신아지오컨설턴트, 이호문화사, p.19~52.
2) "최신 콘크리트 공학", 기문당, 한국콘크리트학회, 1994. 3. 15, p.289~331.
3) 小山幸則 "セクメントの 設計", 日本土木學會, 1994. 6.
4) "실드공법의 실제", 토목연구회, 창우출판, 1992. 3. 15, p.111~168.
5) "토목시술 NO.1", 이전산업시스템, 1993. 9. 1, p.3~6.
6) "토목시술 NO.2", 이전산업시스템, 1993. 10. 1, p.2~6.
7) "토목시술 NO.5", 이전산업시스템, 1995. 5. 1, p.112~121.
8) "쉴드공사의 시공과 적산", 건설도서 편집부역, 1993. 9.

9) "第二千川幹線 その 5 工事施工計劃書", 東京都下水道局, 1994. 9. 1, P.63~P.106.
10) "건설 기술", 쌍용건설 기술연구소, 해동기획, 1995. 3호, p.35~39.
11) "Shield 터널에서의 침하거동에 관한 연구", 강만구, 연세대학교, 1992.
12) "알기쉬운 터널역학", 임영국, 원기술
13) "지하공동구의 설계, 시방에 관한 연구", 한국건설원.
14) "암반 지하 공동의 설계와 사용", 조덕현 외, 창우출판.
15) "터널공학 (조사, 계측의 평가와 이용)", 인하대교수팀, 구미서관.
16) "쉴드터널 표준 시방서", 진치섭 외, 반석건설, 1995, p.45~100.
17) "일본 공업 규격 (JIS)", 일본 공업 표준 조사회, 1991.
18) "한국 공업 규격 (KS)", 한국 공업 표준 협회, 1991.
19) "쉴드 공사용 표준 세그먼트", 일본 토목학회, 일본 하수도협회, 1982.
20) "건설 기술", 쌍용건설 기술연구소, 해동기획, 1995. 2호, p.40~48.