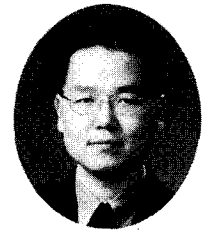


영종대교 주탑 기초의 시공

- Construction of Pilon Foundation for Yongjong Bridge -



길흥배*

1. 서 론

2000년대의 국제적인 항공수요를 대비하여 서울에서 서쪽으로 약 40km 떨어진 인천광역시 서부 해상부에 위치한 영종도 인근에 인천국제공항이 건설되었다. 이 신공항과 수도권을 연결하는 전용 고속도로인 인천국제공항고속도로가 개통되었으며, 인천광역시와 영종도간 해상부는 자동차도와 철도 병용연락교인 영종대교가 건설되었다.

영종대교 (총연장: 4420m)는 강합성교, 트러스교, 및 현수교 구간으로 구성되어 있으며, 중간부분에 위치한 현수교 (교장 550m, 중앙경간 300m, 측경간 125m)는 한국 기와지붕의 곡선을 상징한

세계 최초의 자정식 3차원 케이블 현수교로 되어있다(그림 1).

영종대교 현수교 구간의 주탑은 다이아몬드 형식의 강재 주탑(그림 2)으로, 주탑의 기초 2기(E1, W1)를 시공하기 위하여 뉴메틱케이슨(Pneumatic Caisson) 공법(강각(鋼殼) Floating 방식)이 채용되었다. 뉴메틱케이슨 공법은 47m X 18m X 43m 크기의 강각 케이슨을 육상에서 제작하여 해상 운반, 해저에 착지시킨 후 적절한 공기압 주입으로 해수(海水)를 차단하는 가운데, 지하 작업실에 장착된 쇼벨(Shovel)을 원격 조정하여 굴착/배토하면서 케이슨 구체를 구축하여 최종적으로 경압 암반에 정확히 안착시키는 공법이다. 민자 사업자로 현수교 부분의 시공을 담당

한 삼성물산과 일본의 白石社와의 기술협력에 의하여 시공되었다. 본 기사에서는 뉴메틱 케이슨 기초의 시공에 대해 보고한다.

2. 설계 및 시공 검토

2.1 뉴메틱 케이슨 기초의 채용 경위

영종대교의 주탑 기초는 원설계에서는 강각(鋼殼) 체결에 의한 말뚝기초(RCD 공법)로 계획되었으나 다음에 명시한 설계 및 시공상 문제가 제기되었다.

- ① 말뚝의 길이에 한계가 있고, 지지층이 되는 경암이 부분적으로 알개 출현하기 때문에 불안정한 구조물이 될과 동시에 기초형상이 커진다.

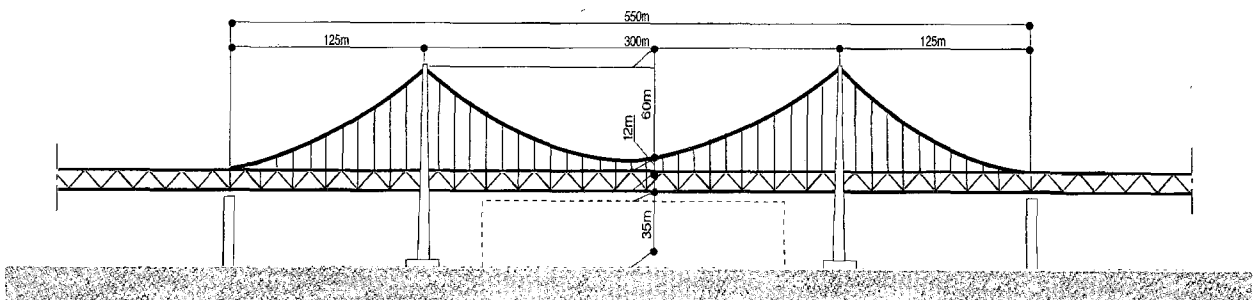


그림 1. 영종대교 전경

* 한국도로공사 도로연구소 구조연구실 책임연구원

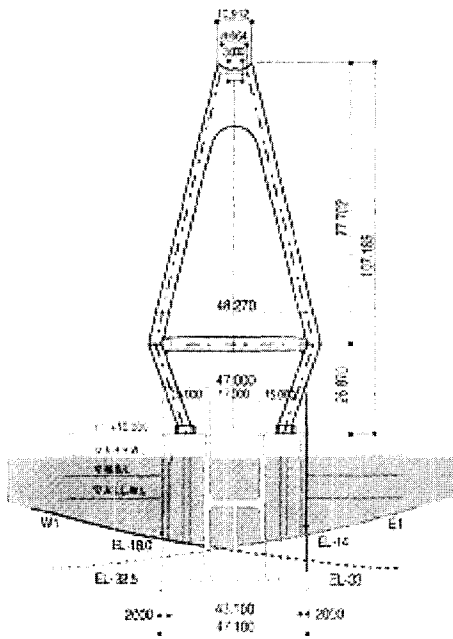


그림 2 영종대교 주탑 단면

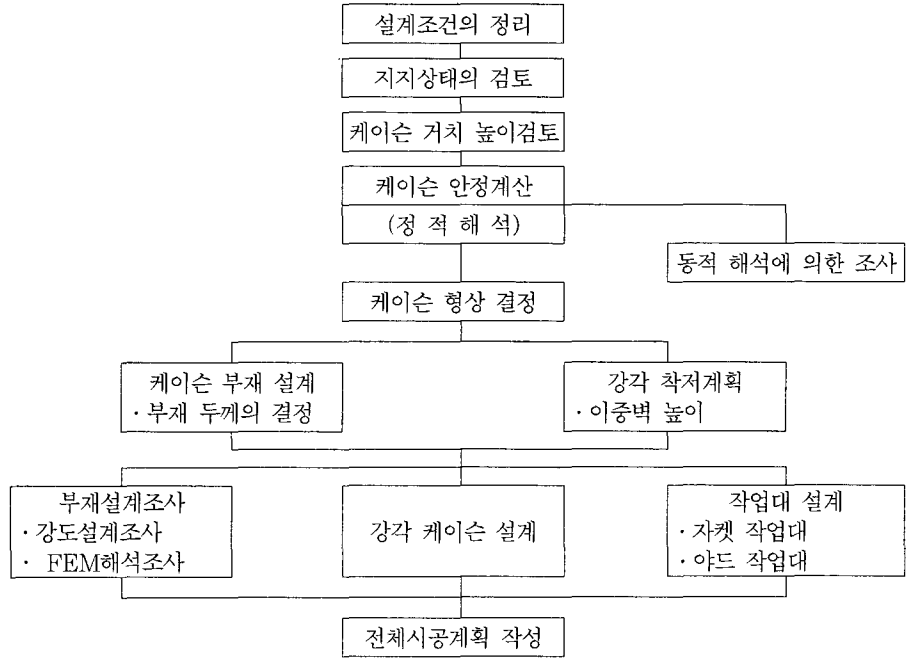


그림 3. 케이슨 설계 전체 흐름

- ② 시공 장소의 현황은 만조시 최대수심이 E1에서 18.5m, W1에서 25.5m이며 평균 간만차가 약 8.5m, 최대 간만차가 약 10.0m, 조류 2.15m/s로 엄격한 해상조건으로 인하여, RCD 말뚝 시공 및 강각 체질에 의한 지수성(止水性) 확보가 곤란하여 기초 구축의 품질확보, 시공 안전성에 문제가 있었다.
- ③ 기초부의 토질은 풍화암, 연암, 경암이 대부분이었고, 특히 W1 기초부는 지지층이 되는 경암이 일부 빠져 밑 3.0m부근에서 출현하여 기초 대각(對角)이 최대 11.5m 경사가 되어져 있었다.

이러한 문제를 극복하기 위한 대안으로 뉴매틱케이슨(Pneumatic Caisson)안과 설치 케이슨안을 생각할 수 있었다. 그 결과, 일본에서 대규모 교량기초에 적용된 시공실적도 많고 해상 시공, 암반 굴삭(掘削)에 대한 시공 확실성이 보장되어 있는 뉴매틱케이슨에 의한 기초 시공법이 채택되게 되었다. 뉴매틱 케이슨 공법은 케이슨 저부(底部)를 슬래브로 막아서 작업실을 만들고 이 작업실에 압축공기를 넣어서 공기압으로 지하수위 유입이나 지반의 보

일링(Boiling)과 히빙(Heaving)을 막으면서 인력굴착으로 케이슨을 침설(沈設)시키는 공법이다.

2.2 설계·시공 검토 사항

주탑 기초를 뉴매틱케이슨 기초로서 설계함에 있어 아래에 나타난 설계·시공 검토사항 문제에 대해 고려를 할 필요가 제기되었다.

- ① 과거의 뉴매틱케이슨 시공시 기압 관리부족으로 인하여 보일링(Boiling)이 발생하고, 고압하에서의 작업으로 인한 작업원의 감압증(減壓症)이 많이 발생되었으며, 그 결과 공정이 지연되게 되어 이후 채용되지 않았다.
- ② 케이슨 기초, 강각, 및 가설 설계는 가혹한 해상·토질조건을 고려할 필요가 있었으며, 특히 인천 앞 바다의 큰 조수 간만차를 감안한 시공성 검토에 많은 고려를 필요로 하였다.
- ③ 시공검토는 완전해상시공이 되는 점을 고려할 필요가 있었다.
- ④ 각각의 설계를 엄격한 시공공정에 맞추어 단기간에 확실하게 실시하여야 필요가 있었다.

2.3 설계 전체 흐름

뉴매틱 케이슨 기초의 설계 전체 흐름을 <그림 3>에 나타냈다.

2.4 케이슨 기초 설계

2.4.1 기초 형상의 검토(안정 계산)

기초 형상 검토에서는 주탑을 기초에 연결하기 위한 앵커프레임의 치수로 구해진 케이슨의 최소평면형상 (47.1m×15.1m)에 대해 <표 1>에 나타낸 3가지 지지상태를 고려하여 비교하였다. 그 결과, E1, W1기초에서 경암의 굴삭(掘削) 토량(土量) 및 총 굴삭 토량이 최소였고, 최대작업 기압(High Water Level시)에서도 0.4 MPa이하로 일반적인 설비로 대응 가능하며 공정·공비에도 유리한 “경암 착저지지(硬岩着底支指)”를 선택하였다.

최종 침설(沈設) 깊이는 가장 깊은 경암의 출현 깊이부터, E1기초는 EL-33.0m,

표 1. 지지 기반별 케이슨 형상 비교

지지 상태	케이슨 평면 형상	케이슨 면적
경암착저지지	47.1m×18.1m	848.0㎡
경암근입지지	47.1m×15.1m	706.7㎡
연암착저지지	47.1m×39.1m	1,837.1㎡

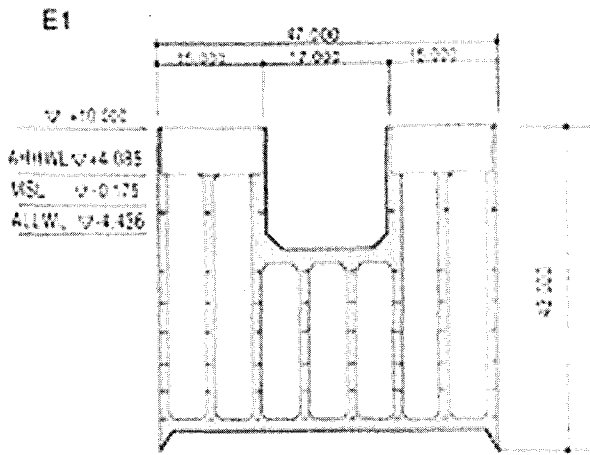


그림 4. E1 주탑 기초

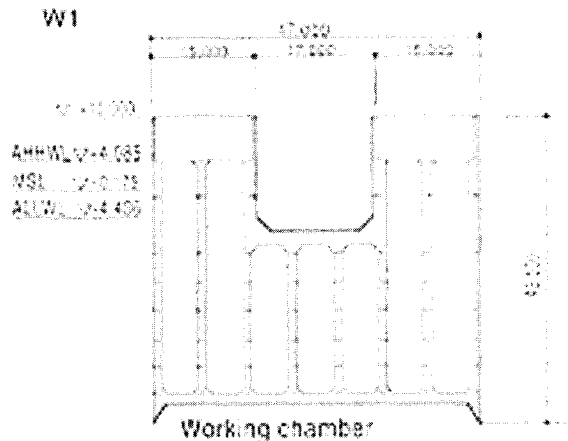


그림 5. W1 주탑 단면 기초

W1기초는 EL-23.5m 이었다. <그림 4>와 <그림 5>에 E1, W1 주탑 케이슨 기초의 구조 일반도를 나타냈다.

케이슨 각부(脚部)는 작용하는 조류력 저감과 콘크리트 체적의 저감(경비 감축)을 고려한 구체(軀體) 형상을 채용하였다. 케이슨 거치 지반고의 결정은 현상의 해저 지반 높이에 대해 마운드(Mound) 조성과 마운드 높이 차이에 따른 다른 공사 수량(강각 높이, 자켓(Jacket) 작업대 높이, 케이슨 굴삭 토량)의 증감, 시공성, 비용, 공기 등을 종합적으로 판단하여 E1 기초부는 EL -14.0m, W1 기초부는 EL -18.0m로 결정하였다.

2.4.2 부재 설계

케이슨 각부(脚部)가 독립된 형상이기 때문에 전체계 FEM 해석과 정판부(頂板部) FEM 해석을 실시하여 응력 조사를 실시하였다. 날끝부(Cutting Edge), 작업실 슬래브, 이중벽(Double Wall)까지의 측벽·격벽 등의 부재의 두께 결정은 강각 케이슨 설계와 더불어 결정되었다.

2.5 강각 케이슨의 설계

강각 케이슨 제작은 전체 공정을 좌우하므로 설계가 종료되기를 기다려 케이슨 재료의 발주 및 제작을 개시하면 공정이 맞지 않게 되었다. 때문에 별도의 팀을 구성하여 신속하게 설계를 하였다. 또, 케이

슨의 착저(着抵) (만조시에도 강각 케이슨이 부력증가에 의해 부상하지 않는 상태)는 일반적으로 구체(軀體)안에 물을 주입(水荷重)하여 실시하지만, 간만차가 큰 해상시공에서는 필요 수하중(水荷重)을 확보하기 위해 측벽 및 격벽의 거푸집부 안에도 강제(鋼製) 이중벽 구조를 채용하였다. 특히 간만차가 8.5m로 큰 영종대교 현장에서는 강각 높이는 E1에서 22.5m, W1에서 26.5m가 되었다. 강각 케이슨의 거치는 3,000t F/C를 이용한 일괄인양방식을 적용하였다.

2.6 가설(자켓 작업대, 야드 작업대) 설계

케이슨 시공에 있어 송기(送氣) 설비 등의 각종 설비와 임시 적하장, 조작실 등을 설치하기 위한 야드(Yard)를 케이슨에 근접시켜 설치할 필요가 있다. 이 야드를 확보하기 위하여 야드(Yard) 작업대를 설치한다. 자켓(Jacket) 작업대는 Caisson의 외주 작업대로서 강각 케이슨을 설치할 때 Guide역할을 하는 등 큰 수평력을 받으므로, 이에 저항할 수 있는 구조 형식의 자켓 작업대를 설치한다. 가설(假設) 설계에서는 자켓 작업대 및 야드작업대(W1은 SEP를 사용)의 설계를 실시하였다.

자켓 작업대의 높이는 E1은 21.5m, W1은 25.5m로 하고, 자켓에 작용하는 하중으로는 자켓 작업대 내부에 거치된 강

각 케이슨을 조류가 통과해가면서 발생시키는 조류력이 있다. 통상 자켓 설계는 2차원 해석으로 실시하지만 작업대폭(B=10.0m)과 비교하여 그 높이가 높고 작용하중도 크기 때문에 3차원 해석을 실시하였다. 또, 자켓(무게: 1,200tonf 및 1,400tonf)의 거치는 공정단축과 해상조건에 대한 안정에 고려하여 3,000t F/C를 이용한 일괄 거치 방식을 채용하였다.

3. 시공

3.1 강각 케이슨 및 자켓 제작공

강각 케이슨 및 자켓의 제작은 인천항 내 석탄부두에서 실시하였다. 강각 케이슨 내에는 Shaft등의 케이슨 의장 설비와 전선 및 계측 케이블과 1 Lot(케이슨 날끝, 작업실 슬래브)의 콘크리트 타설을 위한 설비를 설치하였다.

3.2 가설공

3.2.1 Mound공

강각케이슨 및 자켓 작업대 거치에 있어 수평을 지키고 동선에 안전하게 시공하기 위하여 해저면의 Mound공을 실시한다. 특히 W1 기초부는 모두 성토에 의해 마운드를 조성하기 때문에 마운드 외주부(外周部)에는 조류에 의해 떠내려가지 않도록 들망대를 이용하여 제방을 만들고,

이 속에는 쇠석(Φ20~40mm)를 투입하여 마운드를 조성하는 방식으로 실시하였다.

3.2.2 자켓 작업대 및 강각 케이슨 설치
자켓 작업대(외부 치수 69.0m×40.0m)는 3,000t F/C를 이용하여 설치하였다. 제작장인 안벽으로부터의 인양은 만조시간대인 3시간만에 실시하였다. 인양된 자켓 작업대는 현장까지 그대로 예항하였으며, 설치작업은 조수가 없는 간조시에 실시하였다. 강각 케이슨도 3,000t F/C로 인양하였으며, 현장까지 예항한 후 조류가 없을 때에 자켓작업대 내부에 설치하였다. 조류에 의해 강각케이슨이 계속 기울어지기 때문에 안전관리상 가능한 한 빨리 강각케이슨이 부유중인 상태에서 1 Lot의 콘크리트를 타설하였다.

3.3 뉴매틱 케이슨 기초공

3.3.1 케이슨 착저(着底) 작업

착저(着底) 작업은 케이슨 침설(沈設)

정도(精度)를 확보하기 위한 중요한 작업이다. 착저 작업은 E1에서 제2리프트 타설 후, W1에서 제3리프트 타설 후, 이중벽내에 수하중(水荷重)을 주입하는 것으로 실시하였다. 착저에 있어서는 정도를 높이기 위해 기존 자켓의 방현재(防舷材)가 아닌 Jack 10(60tonf 용량) 대를 각각 4방향에 별도로 설치하였다.

통상적으로 착저 작업은 침하력이 최대가 되는 간조에 실시하지만, 조류가 빠르기 때문에 만조시를 겨누어 물을 주입하고, 날끝부가 해저면(海底面)에서 30cm정도 위에 위치하도록 수하중(水荷重)을 관리하였다. 그 후, 만조시 조류가 없을 때에 케이슨이 수직이 되는 시점에서 다시 약 6,000tonf의 물을 수주(水注)하여 착저시켰다.

3.3.2 케이슨 설비공

현장의 매우 큰 조수간만의 차이를 고려하여 조위(朝位) 연동식인 자동압력 조정장치를 채용하였다.

작업시간대에 함내에 0.1MPa 가깝게 압력차가 발생되기 때문에 조위에 연동시켜 압력관리를 자동으로 실시한 시스템은 매우 유효하였다. 혹한기에는 기온이 -15℃정도까지 내려가기 때문에 송기를 위한 배관재(配管材) 등에는 테이프히

터를 감고 유리벽으로 덮어 드레인이 얼지 않도록 하는 등 한냉지 대책을 실시하였다.

3.3.3 침하(沈下) 굴삭(掘削)공, 구체 구축(躯体構築)공

암반발파작업을 제외한 침하 굴삭은 지상 원격조작 시스템을 채용하였다. 굴착은 유,무인 굴착을 병행하였다. 케이슨 구체는 아래 <표 2>와 <표 3>에 보여준 것과 같이 13 Lot으로 나누어 콘크리트를 타설하였다. 1 Lot의 콘크리트는 강각케이슨에 설치된 배관을 이용하였고, 2 Lot - 13 Lot의 콘크리트는 Boom을 이용하여 타설하였다. 2대의 해상 B/P를 이용하여 콘크리트를 믹서하였으며, 믹서된 콘크리트는 야드 작업대에 위치한 콘크리트 펌프차에 압송된 후 구체 구축을 위하여 타설되었다. 구체 중, 6 Lot에서 13 Lot까지는 합판 거푸집과 Climbing Form을 사용하여 구축하였다. 각 Lot의 타설 후, 1일이 경과하면 다음 lot을 타설하기 전에 고압세척기를 이용하여 Laitance를 제거하였고, 제거된 Laitance는 진공펌프를 이용하여 배출하였다.

4. 결 론

영종대교 현수교 구간의 E1과 W1에 각각 3,000tonf 이상의 콘크리트가 케이슨 기초를 건설하기 위하여 투입되었으며, 작업일수는 200일 이상이였다. 영종대교에 적용된 뉴매틱 케이슨 공법의 적용이 국내 외에 크게 확산될 것으로 기대한다. □

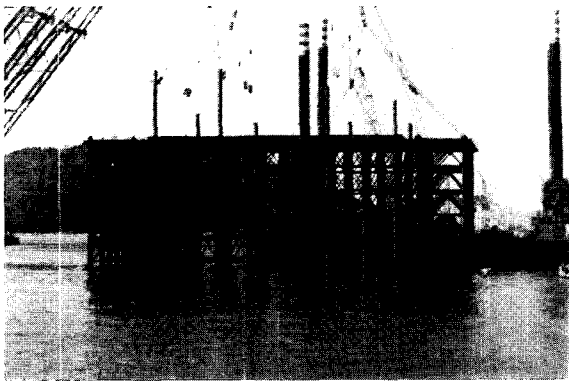


그림 6. Jacket 작업대 설치

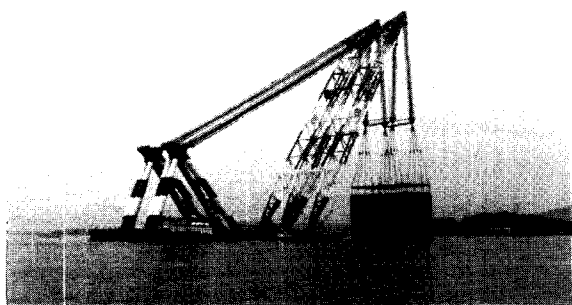


그림 7. 강각 케이슨 예항

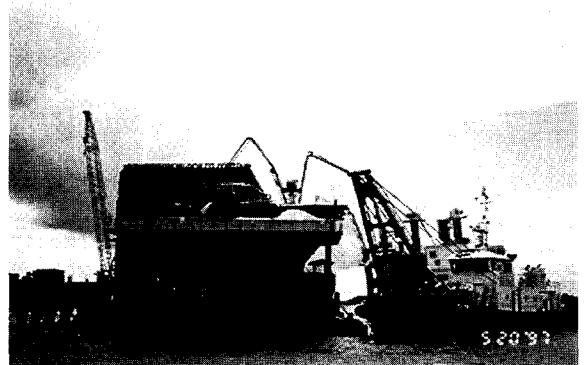


그림 8. 콘크리트 타설 광경

표 2. E1 케이스

Lot	높이 (m)	콘크리트 수량 (m ³)	철근량 (Ton)	작업일수
1	4.0	1,743	105.43	10
2	3.75	1,442	98.84	10
3	3.75	1,332	98.84	8
4	3.75	1,442	98.84	4
5	3.75	1,442	98.84	16
6	1.3	377	32.16	19
7	3.7	1,335	99.63	28
8	3.0	1,488	79.07	25
9	2.05	588	54.03	10
10	3.5	882	92.25	13
11	2.6	869	92.25	16
12	0.95	273	25.04	14
13	4.0	242	105.43	20
계	41.00	13,455	1,080.69	193

표 3. W1 케이스

Lot	높이 (m)	콘크리트 수량 (m ³)	철근량 (Ton)	작업일수
1	4.0	1,743	106.02	10
2	3.27	1,368	86.67	9
3	4.23	1,616	112.12	5
4	3.75	1,450	99.39	19
5	3.75	1,415	99.39	23
6	0.8	294	21.20	16
7	3.7	1,291	98.52	18
8	3.0	1,516	79.52	16
9	2.05	597	54.34	26
10	3.5	912	92.77	11
11	2.6	935	92.77	21
12	0.95	274	25.18	15
13	4.3	267	106.02	15
계	40.50	13,284	1,080.69	204

경제 용어 해설

● 뉴 라운드

: 라운드(round)란 영어로 '둥글다'는 뜻이다. 협상 테이블을 연상하면 된다. 국제 통상 및 경제 용어로서의 라운드는 이해 당사국이 모든 현안을 테이블에 모아 놓고 머리를 맞대고 논의하는 것을 말한다. 따라서 세부적인 주제를 하나씩 논의하는 양국 간 협상과는 대비되는 개념이다. 최근 논의되고 있는 뉴 라운드는 기존의 통상 이슈 외에 새로운 무역 관련 의제를 다시 한자리에 모아 여러 나라들이 함께 논의한다는 의미를 담고 있다. 예컨대 지난 1947년 관세 및 무역에 관한 일반 협정(GATT) 이후 1960년대 케네디 라운드는 주로 관세 분야를 둘러싼 무역 문제를 논의했다. 그러나 1972년부터 1979년 사이의 도쿄 라운드는 반덤핑 관세 등 무역이 확대되는 과정에서 불거지는 다양한 의제를 협의했다. 또한 1986~1993년의 우루과이 라운드는 농업 및 서비스 분야가 주요 대상이었다. 지금은 확대된 무역 질서에 걸맞는 새로운 21세기 국제 경제 규범을 논의하기 위해 연말까지 뉴 라운드 의제를 확정하는 단계이다.

● 툰키 방식

: 플랜트 수출이나 해외 건설공사 등에서 수주 방식 중 하나. 키(열쇠)만 돌리면 설비나 공장을 가동시킬 수 있는 상태로 인도한다는 데서 유래했으며 일괄수주계약이라고도 한다. 시공자가 조사, 설계에서부터 기기 조달, 건설, 시운전 등 전 과정을 맡게 된다. 인력이 부족한 중동 국가들로부터 플랜트 상담이 대부분 툰키 방식으로 이루어진다. 이와 비슷한 용어로 녹다운 방식이 있는데 이는 부품 상태로 수출한 뒤 현지에서 조립, 완성품을 만드는 형태로 주로 자동차 수출에 이용되고 있으며 수출업체 입장에서선 완제품보다 부품의 관세가 낮으므로 유리하다.