

# 化學의 産室, Aberdeen 大學

韓 基 成

〈仁荷大學校 教授〉

## I. 머리 말

1979년 7월부터 1980년 6월까지 1년 동안 英國 Scotland에 있는 Aberdeen 大學에서 시멘트化學에 대한 研究를 하고 돌아온지도 벌써 1년이 더 넘었다. 그때의 研究生活을 통하여 直接 보고 느꼈던 일들을 돌이켜 보면서 우리나라 시멘트化學의 나아갈 方向을 모색해 보고자 한다.

Scotland의 Aberdeen은 우리에게 좀 생소한 감이 없지 않다. Scotland는 원래 1707년 英國 (Great Britain)과 合併하여 聯合王國(United Kingdom)을 이루기 전까지는 엄연한 獨立國家였다. 그동안 겪어온 우여곡절은 論議로 하고 현재도 그들은 상당한 異質의인 要素를 지니고 있는데, 言語, 風習에서 부터 貨幣의 別도發行 및 學制에 이르기까지 Scotland人的 獨立愛鄉心을 固守하는 모습을 여러면에서 엿볼 수 있다.

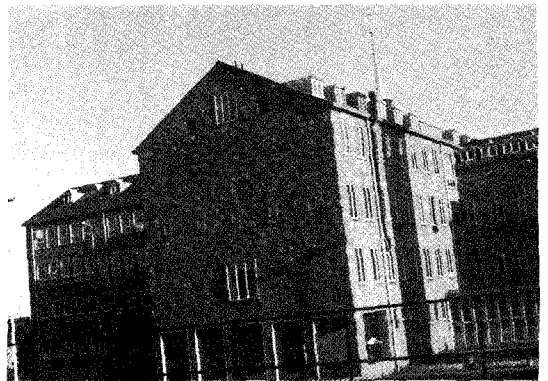
北歐圈에 속하는 Scotland地方은 北緯 56°에서 59°사이에 位置하나 여름 氣溫은 平均 17~18°, 겨울 氣溫은 零度 内外로 年中 氣溫差異가 별로 없는 것이 特徵이다. 또한 北歐 特有的 바람불고 번덕스런 구진 날씨가 계속되며 이것이 이 地方 사람들의 忍耐力과 꾸준히 일하는 습성을 길러준 원인이 아닌가도 생각해 본다.

그중에서도 Aberdeen은 Scotland 東北部의 港口都市로서 옛부터 漁港으로 유명하였으나 現在는 北海石油開發 前進基地로 꽤 활발한 양상을

띄우고 있다.

人口가 약 20 만명에 가까운 Aberdeen市는 “花崗岩의 都市”란 별명이 붙을 만큼 각종 構築物은 물론 道路의 鋪裝까지도 花崗岩으로 되어있는데 요즘 새로 세워지는 建築物에는 시멘트가 주로 쓰여진다.

시멘트의 歷史的인 考察은 그만두더라도 1824年 英國의 Joseph Aspdin이 포틀랜드시멘트의 發明特許를 얻기까지 많은 英國사람들에 의해서 이 새로운 시멘트의 開發이 이루어졌다는 것은 상식적으로도 알아둘 必要가 있다. 1756年 John Smeaton은 Plymouth의 Eddystone Rocks에 燈台를 세우는데 사용하기 위해 粘土質이 많은 石灰石을 구어 만든 水硬性 石灰를 開發했고, 1796年 James Parker는 Roman cement를 開發하였으며 1811年 James Frost는 石灰石에 粘土를 混合하는 새로운 製造法에 대



Aberdeen 大學

한 特許를 얻기도 하였다.

이와같이 시멘트研究에 대한 歷史的인 배경을 가지고 있는 나라에서 現在도 많은 사람들이 研究에 몰두하고 있다. 1年이란 짧은 기간이나마 그 분위기에서 그들과 함께 시멘트化學을 研究할 기회를 얻을 수 있었던 것은 참으로 多幸한 일이었다고 생각된다.

## II. Aberdeen 大學

Aberdeen 大學은 약 500年前인 1494년에 創立된 King's College 와 1593년에 設立된 Marischal College 가 1860년에 合併하여 이루어진 大學으로써 Scotland에서는 St. Andrews, Glasgow 大學과 함께 오랜 歷史와 傳統을 가지고 있다.

이 大學에서 1964년에 出刊된 “시멘트化學” (2卷)의 編著者 H. F. W. Taylor 教授, 無機物質의 熱分析과 赤外線 分光學으로 유명한 R. C. Mackenzie 教授, 土壤研究에 功績이 많은 V. C. Farmer 教授 등은 시멘트·콘크리트 關係者들에게도 널리 알려진 분들이다.

이 大學의 化學科에는 有機化學, 物理化學, 分析化學, 分光化學, 生化學 및 土壤化學 등의 分野도 있으며 시멘트化學의 研究는 無機化學分野에서 맡고 있다. 無機化學 가운데 본격적으로 結晶化學을 基礎로한 시멘트化學의 研究가 시작된 것은 1953년에 Taylor 教授가 London 大學에서 Aberdeen으로 移轉한 뒤 부터였다. 그무렵 化學科 建物は 花崗岩都市의 建物답게 붉은 花崗岩으로 멋지게 서 있었다. 正門玄關을 들어서면 無機化合物의 結晶模型 展示藏이 즐비하게 늘어서 있는 것이 印象的이다.

Taylor 教授와 함께 시멘트化學 系統의 研究를 하고 있는 F. P. Glasser 와 L. S. D. Glasser 는 夫婦教授로서 活躍을 하고 있으며 J. A. Gard 博士와 E. E. Lachowski 博士는 電子顯微鏡을 利用한 結晶構造解析과 기타 새로운 實驗方法을 利用한 시멘트化學 研究에 專念하고 있다.

### 1. J. D. Bernal 教授의 影響

Taylor 教授가 시멘트化學을 研究하게 된데는 Bernal 教授의 影響이 컸다.

Bernal 教授는 結晶學을 中心으로한 物理學의 大家로서 科學, 技術에 연관된 歷史 및 哲學에 대한 著書도 많이 가지고 있다. Cambridge 大學을 卒業한 후 London의 Royal Institute의 W. H. Bragg 研究室에서 4年間 본격적인 結晶學研究를 하였고 그뒤 Cambridge 大學에서 10年間, 1937年 부터는 London 大學의 Birkbeck College에서 物理學 教授로 活躍하는 동안 X線結晶學과 生化學 등에 많은 功績을 남겼으며 2名の 노벨受賞者의 弟子를 배출시키기도 하였다.

Bernal 은 第2次大戰 후 시멘트物質의 構造에 관심을 갖게되어 칼슘규산鹽類에 未知分野가 많음을 지적하고 이들의 構造解析의 必要性을 역설하였다.

英國에서는 일찌기 1921년에 建築研究所 (Building Research Establishment)를 設立하여 建築材料 研究를 본격적으로 하고 있었으며, 2次大戰 후에는 基礎研究를 大學에 委囑, 시멘트·콘크리트分野에 세가지의 project 가 契約되었었다. 鐵筋構造의 研究는 Cambridge 大學의 J. H. Baker 教授에게, 鐵筋콘크리트設計에 관한 研究는 Imperial College의 A. L. Baker 教授에게 그리고 시멘트水和物의 結晶化學의 研究는 Birkbeck College의 J. D. Bernal 教授에게 맡겨졌다.

5年契約의 Bernal 의 project (1948~1953)는 젊은 研究員, J. W. Jeffery, L. Heller 및 H. F. W. Taylor 에 의하여 수행되었었다. Jeffery는 시멘트 크링카鑛物 특히  $C_3S$ 의 結晶構造解析과, 한편 크링카鑛物이나 시멘트水和物質 같은 微小結晶 解析을 위한 X線裝置의 改良에 관한 研究를, Heller는  $CA, \alpha-C_2S$  水和物의 構造解析과 칼슘규산鹽水化物의 加熱에 의한 構造變化에 관한 研究를 하였고, Taylor는 시멘



J. D. Bernal  
(1901-1971)

트水和物을 포함한 C-S-H系物質의 構造解析에 대한 研究를 본격적으로 着手하였다. Bernal 과 이들 3名의 共同研究結果는 1952年 London 에서 開催되었던 國際시멘트化學 심포지움에서 발표되었고 參席者에게 큰 感銘과 시멘트化學 研究에 대한 새로운 問題點들을 제기 시켰다.

Bernal의 새로운 project에 參與한 것이 계기가 되어 Taylor는 그 方面의 研究를 계속하고 있는 것이다.

## 2. H. F. W. Taylor 教授

1953年, Bernal의 project를 마친 Taylor 教授는 Aberdeen大學의 化學科로 자리를 옮기고 오늘에 이르기까지 약 200編에 가까운 研究論文을 발표한 바 있으며 그들은 結晶學을 바탕으로 하는  $\text{CaO-SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3-\text{H}_2\text{O}$  系의 시멘트 관련物質과 含水珪酸鹽 物質의 構造解析, 化學反應構構의 究明 研究로 一貫하여 왔다. 이들의 研究業績에 대하여 美國鑛物學會 (1959)와 美國窯業學會(1979)로 부터 學術研究賞을 받기도 하였다.

Nottingham大學에서 核酸의 研究로 1946年에 Ph.D.를 받은 Taylor는 Bedford College (London大學)에서 Molecular sieve의 研究로 유명한 R.M. Barrer 教授 밑에서 2年間  $\text{TiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$  系의 研究를 하게되어 有機에서 無機로 轉向을 하게 되었고 그뒤 Birkbeck College의 Bernal 教授의 새로운 project에 參加함으로써 본격적으로 시멘트化學의 研究를 着手하게 된 것이다.

Taylor는 처음부터 시멘트의 水和物에 대한 研究를 시작하지 않고  $\text{CaO-SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ 系의 純粹 組合物을  $\text{CaO/SiO}_2 = 1.0 \sim 3.0$  範圍에서 合成하여 이들 生成水和物에 대한 상세한 characterization을 天然鑛物과 비교해가며 수행 하였다.

室溫에서의  $\text{CaO-SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ 系 相平衡 研究에서 化學組成이 연속적으로 變化하는 低結晶性 水和物, C-S-H(1) 및 C-S-H(2)는 層狀 構造를 가질 것을 지적하고 含水量의 變化에 따라 그들의 底面間隔이 減少하는 사실을 究明하

였다. 이것은 실제의 水和시멘트나 콘크리트의 乾燥收縮이 微小水和物間의 空隙水의 移動에 의해서 뿐만 아니라 結晶의 格子單位의 두께 變化가 材料의 收縮現象을 가져옴을 나타내는 것이 된다. 이때 Bernal은 시멘트 水和物과 天然鑛物 tobermorite가 構造적으로 類似성을 가질 것이라는 것을 指摘하였고 그 構造解析의 必要性을 강조하였다. 그뒤 Cambridge의 Megaw가 이 일을 수행하였고 Taylor는 天然産 규산칼슘水和物의 研究에 專心하였다.

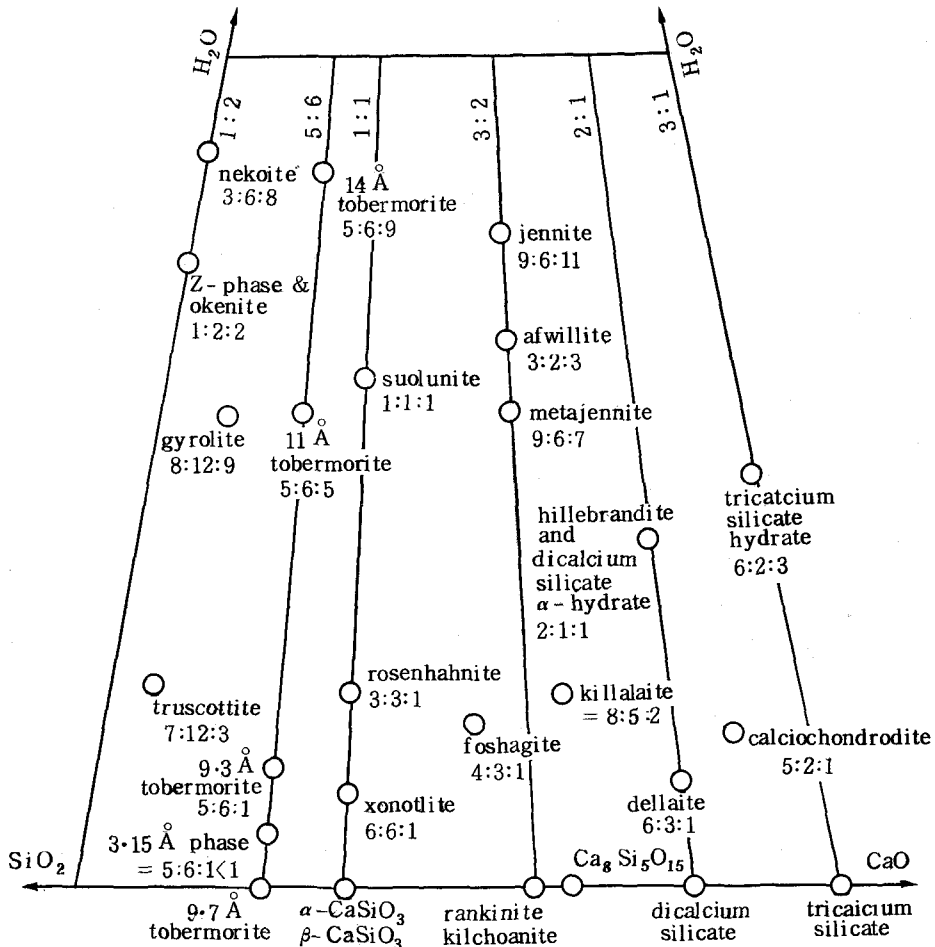
含水칼슘규산鹽은 시멘트나 autoclave處理 建築材料와 密接한 關聯이 있고 變化가 많은 興味있는 鑛物群이다. 現在 22種의 結晶性 物質이 알려져 있으며 그중 18種은 天然에서 産出되고 있다.

다음 <그림-1>에 이들 結晶性 物質의 名稱과 化學組成을 표시 하였다. 이들에 대한 研究는 物質의 상세한 characterization, 즉 unit cell의 決定(良質結晶의 構造解析), 化學分析, 光學·電子顯微鏡 觀察, 熱分析, 赤外線分光分析을 주로 하였고 특히 加熱에 의한 脫水和 構造變化의 研究에 主力하였다. L.S. Dent Glasser와 함께 究明을 한 xonotlite의 脫水에 의한 wollastonite에의 轉移에 관한 研究(1956)는 칼슘규산鹽水和物에 대한 최초의 topotactic反應의 論文이었다.

gel에서 tobermorite로 結晶化하는 과정에 대한 研究가 많았고 水熱反應으로 合成을 하고 X線과 電子顯微鏡 觀察에 의하여 微構造와 形態變化를 究明하였다. 그에 따라 tobermorite에는 正常型, 異常型 및 混合型이 있음을 알았고 이



Taylor와 찍은 사진



〈그림-1〉 칼슘규산염 결정과含水 칼슘규산염 결정의 화학組成(CaO:SiO<sub>2</sub>:H<sub>2</sub>O)와 물질名

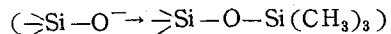
들의 構造解析과 合成條件 등도 밝혀 내었다.

最近에는 autoclave 處理 材料中の 構成水和物의 定量, 시멘트의 水熱處理方法과 生成物의 關係 등에 관한 研究도 進行중에 있으며 특히 油井시멘트나 地熱시멘트에 關聯된 水熱反應 研究에 力點을 두고 있다.

포틀랜드시멘트의 初期 水和反應과 알루미늄시멘트의 水和反應에 대한 基礎研究에도 言及을 하지 않을 수 없다.

포틀랜드시멘트를 paste 狀態로 水和시키면 常溫에서는 C-S-H gel의 非晶質狀 物質과 Ca(OH)<sub>2</sub>가 主要 生成物이나 水和反應機構와 生成物의 組成에 대한 理論은 아직도 確立되지 않

고 있어 學者들 사이에 保護膜說(Protective layer theories)과 遲延核生成說(Delayed-nucleation theories) 등이 論議되고 있다. Taylor와 함께 L. S. D. Glasser, E. E. Lachowski 등은 分析電子顯微鏡(Analytical electron microscope)을 이용하여 C<sub>3</sub>S 또는 β-C<sub>2</sub>S의 paste 水和中の Ca(OH)<sub>2</sub>와 未反應物質과의 定量, C-S-H의 平均 Ca/Si te를 算出하고 있고 trimethylsilylation 方法으로 非晶質에 가까운 C-S-H 粒子的 内部構造 究明에 대한 研究도 하고 있다. 이 方法은 物質中の silicate anion을 trimethylsilyl 誘導體



로 變換 分離시키고 gas-liquid-chromatography

로 定性 또는 定量하는 것이다. 이 GLC方法의  
에 gel-permeation chromatography가 最近 使用  
되어지고 있기도 하다.

J. A. Gard 博士는 電子顯微鏡學에 관한 權威學  
者로서 약 30年間 電子顯微鏡을 다루고 있는  
研究官이다. Taylor와 함께 含水칼슘규산鹽物質  
의 研究에서 많은 業績을 내어 놓았고, 다른 教  
授들과도 많은 共同研究를 수행하고 있다. X線  
法으로는 單結晶의 回折이 困難한 경우라도 電  
子回折을 병용하여 unit cell을 결정하고 微小構  
造의 解析을 잘 처리하고 있다.

### 3. F. P. Glasser, L. S. Dent Glasser 夫婦教授

F. P. Glasser는 1952年 美國 Connecticut 大學  
을 마친 뒤 1958年 Pennsylvania 大學에서 Ph.  
D.를 받았으며 1959年부터 줄곳 Aberdeen 大學  
에서 勤務 중에 있고 高温酸化物化學, 相平衡, 結  
晶化學 및 熱分析 등에 대한 講義와 研究를 담  
당하고 있는 美國이 본적인 教授이다.

Cambridge 大學을 나와 Aberdeen 大學의 Tay-  
lor 教授 밑에서 1957年에 칼슘규산鹽과 알루미늄  
산鹽의 熱分解에 의한 結晶學的 研究란 題目으  
로 Ph. D.를 얻은 L. S. Dent Glasser는 그해 부  
터 美國의 Pennsylvania 大學에서 2年間 研究生  
生活을 하였다. 그것이 계기가 되어 Fred Glasser  
와 結婚을 하게 되었고 Aberdeen 大學의 化學科  
에서 夫婦教授로서 活躍을 하고 있다.

Dent Glasser는 규산鹽과 알루미늄산鹽에 대한  
結晶構造 解析, 알칼리 규산鹽의 生成反應 및  
규산鹽 陰이온에 대한 化學的 研究 등을 맡고 있  
어 Taylor 教授와의 共同研究도 수행하고 있다.

Fred Glasser는 高温酸化物 物質의 相平衡과  
熱分析을 맡고 있어 시멘트크링카 鑛物系統의  
研究를 많이 다루고 있다.

現在까지 약 150編에 가까운 研究論文을 發  
表하고 있는데 近年에 發表된 것중에 시멘트크  
링카鑛物에 관한 것의 題目을 골라보면 다음과  
같다.

(1) The thermal decomposition of  $C_3S$  at  
temperature below  $1250^{\circ}C$ . 1. Pure  $C_3S$



Fred Glasser와 찍은 사진

and the influence of excess CaO or  $C_2S$ .  
(1977)

- (2) The thermal decomposition of  $C_3S$  at  
temperature below  $1250^{\circ}C$ . 2. The in-  
fluence of Mg, Fe, Al and Na oxides on  
the decomposition. (1977)
- (3) The thermal decomposition of  $C_3S$  at  
temperature below  $1250^{\circ}C$ . 3. The in-  
fluence of water and sulphate on the de-  
composition. (1977)
- (4) The role of sulphates in cement clinkering  
reactions: Phase formation and melting  
in the system  $CaO-Ca_2SiO_4-CaSO_4-K_2SO_4$ .  
(1977)
- (5) Role of iron and aluminum oxides as  
fluxes during the burning of portland  
cement. (1978)
- (6) Role of sulphates in cement clinkering:  
The calcium silicosulphate phase. (1978)
- (7) Crystallization of the molten phase in  
portland cement clinker. (1978).
- (8) Stabilization of nuclear waste constituents  
in portland cement. (1979)
- (9) The role of sulphates in cement clinkering:  
Subsolidus phase relations in the system  
 $CaO-Al_2O_3-SiO_2-SO_3$  (1979)
- (10) Powder diffraction data for compounds  
in the series  $Nax(Ca_3xNaxAl_2O_6)$  (1979)
- (11) Crystallochemical stabilization of radwaste  
elements in portland cement clinker (1979)

- (12) Studies of the crystallization of the liquid phase in portland clinker: effects of MgO and Na<sub>2</sub>O (1980)
- (13) Crystallization of the liquid phase developed during clinkering (1980)
- (14) Sulphates in cement clinkering: Immiscibility between sulphate and oxide melts at 1350°C (1980).
- (15) Compositions of stable and metastable C<sub>3</sub>A solid solutions crystallized from stimulated clinker melts (1981)

위에 제시한 研究論文 題目에서도 볼 수 있는 바와 같이 Fred Glasser 는 시멘트 크링카의 高温에서의 反應性, 크링카 融液의 冷却過程에서의 結晶化 등을 相平衡과 結晶學的인 면에서 基礎的으로 究明하고 있다.

Aberdeen 大學에서의 본인의 研究는 주로 Fred Glasser 와 共同으로 수행되었으며 포틀랜드시멘트 크링카 融液의 結晶化 特性과 結晶生成物의 究明에 관한 것이었고 상세한 내용은 第9회 시멘트 심포지움(1981年 5月)에서 發表하였다.

Glasser 는 最近 時代의 추세에 부응하여 放射能 廢棄物成分을 포틀랜드시멘트 크링카에서 安定化시키는 研究도 進行하고 있다.

또한 그는 高温 相平衡, 珪酸鹽의 熱分析, 시멘트化學에의 相律의 應用 그리고 無機 및 窯業物質의 高温化學 등에 대한 著述도 있다.

Dent Glasser 의 1977 年에 發刊한 結晶學과 그 應用(crystallography and its application)이란 單行本은 無機材料를 공부하는 우리들에게 많은 도움이 되는 冊이라 본다.

### Ⅲ. 맺 음 말

Aberdeen 大學에서 1年間 보고 겪고 느꼈던 가지가지를 추려 적어 보았다. 學問研究의 歷史와 傳統이 맥맥히 이어져 내려오고 있는 참모습을 直接 보고 우리의 現實을 뒤돌아 볼때 가슴속에 커다란 충격을 받지 않을 수 없었다.

Taylor 教授를 위시하여 Glasser 教授 夫婦, Gard 博士 등 一流 權威學者들이 지금도 自身이 直接, X線 필름의 現象으로부터 컴퓨터室의 편

치카드作業, 때로는 熱分析 또는 赤外線 分光分析 實驗 등을 즐거운 모습으로 하고 있는 것이다.

당장 活用할 수 있는 技術의 開發, 날로 缺乏되어가는 資源問題의 解決, 에너지節約을 위한 研究課題 등 시급한 문제들이 山積해 있는 현시점에서 심오한 學問의 기반을 다지는 基礎研究에 몰두하고 있는 그들의 모습은 한편 고귀하기도 하다. 이러한 꾸준하고 熱誠的인 研究結果가 결국은 새로운 學問의 發展, 새로운 技術을 啓發하는 原動力이 될 것임은 明若觀火한 사실이다.

Fred Glasser 教授는 1982年 3月 下旬 日本 시멘트 심포지움에 參席할 예정으로 되어 있어 韓國窯業學會와 韓國洋灰工業協會에서는 그 機會를 이용하여 共同으로 그를 우리나라에 招請키로 하였다. 우리나라의 學界와 시멘트業界를 돌아보겠고 두차례의 講演도 計劃하고 있다. 演題는

(1) The development of high-temperature oxide materials : principles and practice.

(2) The scientific basis of clinkering reactions. 으로 內定되어 있다. 우리 窯業人 특히 시멘트 關係者들에게는 有名 海外學者를 接할 수 있는 좋은 기회라 생각한다.

雙龍中央研究所의 한 젊은 研究員이 금년 10月부터 1年期限으로 Aberdeen 大學 化學科에서 시멘트化學에 관한 研究를 수행중에 있으며 여러모로 매우 보람있는 일이라 생각한다.

中世期の 面貌를 곳곳에서 느낄 수 있는 Scotland의 분위기 속에 위치한 Aberdeen, 맑고 상쾌한 空氣, 1年 내내 푸른 잔디가 펼쳐져 있는 草原, 北海의 파도가 넘실대는 海岸, 그중에 우뚝 솟은 옛 모습의 King's College 와 붉은 花崗岩으로 육중하게 構築된 化學科 建物 등 勉學에는 이룰데 없는 좋은 환경 조건이다.

英國의 에너지 問題를 떠맡고 있는 北海 海底油田의 開發을 大學과 漁港의 都市 Aberdeen 에도 많은 變革을 가져오고 있다. 그러나 學問의 傳統을 굳굳히 繼承하여온 그들이기에 學問의 都市로서의 Aberdeen 의 모습은 그대로 지켜지리라. ♣♣♣